

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

**Možnosti použití hybridního pohonu u kolejových
motorových vozů.**

**(POSSIBILITIES OF HYBRID DRIVE APPLICATION
FOR RAIL MOTOR CARRIAGE)**

Student:

Jakub Stavianis

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaromír Široký, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Stavianis**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie
Téma: **Možnosti použití hybridního pohonu u kolejových motorových vozů**
Possibilities of Hybrid Drive Application for Rail Motor Carriage

Zásady pro vypracování:

Cíl:

Cílem práce je posouzení možnosti použití hybridních pohonů u kolejových motorových vozů v provozu na regionálních tratích a návrh výpočtu využitelnosti tohoto pohonu na konkrétním traťovém úseku.

Postup řešení:

1. Analýza možností použití hybridních pohonů u kolejových vozidel.
2. Výpočet využitelnosti hybridního pohonu na konkrétním traťovém úseku.
3. Návrh zásad technologie vedení vlaku hnacím vozidlem s hybridním pohonem.
4. Provozně-technické hodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

Famfulík, J. a kol. Lokomotivní simulátor. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2010. [on line] dostupné:
http://www.id.vsb.cz/loksim/LS_skripta.htm

Široký, J. Mechanika v dopravě I. Kolejová doprava. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2004.

Ehsani, M., Gao, Y., Emadi, A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. London: CRC Press. 2010.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaromír Široký, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



Aleš Slíva

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2023

Gloria

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было с́jednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было с́jednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2013

G. Moravský

Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jakub Stavianis

Adresa trvalého pobytu autora práce: Široký Brod 129, Mikulovice 790 84

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

STAVIANIS, J. *Možnosti použití hybridního pohonu u kolejových motorových vozů: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2013, s. Vedoucí práce: Ing. Jaromír Šíroký, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá posouzení možnosti použití hybridních pohonů u kolejových motorových vozů v provozu na regionálních tratích a návrh výpočtu využitelnosti tohoto pohonu na konkrétním traťovém úseku. V úvodní části se budu zabývat hybridními systémy obecně a technologií jízdy hybridních vozidel. Dále ukázkou aplikací hybridního pohonu u kolejových vozidel u nás a ve světě. V další části navrhnu důležité parametry vozu, a provedu výpočet tachogramu k získání energií na obvodě kola. Pro určení spotřeby navrhnu účinnosti pro jednotlivé fáze jízdy a výpočtu spotřebu. Závěrem bude zhodnocení energetické úspory.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

STAVIANIS, J. *Possibilities of Hybrid Drive Application for Rail Motor Carriage*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical, Institute of transport, 2013, p. Vedoucí práce: Ing. Jaromír Šíroký, Ph.D.

The purpose of my baccalaureate thesis is to assess the possibilities of using hybrid drives for tracked motor vehicles operated on regional railway tracks and to design a calculation of usability of such drives at specific track sections. In the introductory part, I am going to deal with hybrid systems in general and with the technology of hybrid vehicle motion. Then I will demonstrate some applications of hybrid drives for tracked vehicles in our country and in the world. In the next part, I am going to design the key parameters of the vehicle and I will carry out a tachogram calculation (power-speed diagram) to obtain the values of energies present at the circumference of the wheel. To determine the consumption, I am going to design efficiencies for the individual motion stages and I will enumerate the particular consumptions. The closing part of my thesis will be dedicated to assessing the resulting energy savings.

Seznam použitého značení

Značka:	Význam:
AC/AC	Střídavě – střídavý přenos výkonu
CZ LOKO	Český výrobce lokomotiv
ČD	České dráhy
ČKD	Českomoravská Kolben a Daňek
ČVUT	České vysoké učení technické
ČSD	Československé dráhy
EVPU Nová Dubnica	Elektrotechnický výzkumný a projektový ústav
GPS	Global Positioning System
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MSV Elektronika	Výrobce elektronických systémů pro kolejová vozidla
MTU	Výrobce motorů patřící do skupiny Tognum
TA	Trakční alternátor
TM	Trakční motor
SBB	Švýcarské spolkové dráhy
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty
ZF	Výrobce převodovek

Obsah

Seznam použitého značení.....	1
Úvod.....	5
1) Princip funkce hybridního pohonu.	6
1.1) Uspořádání hybridního pohonu.....	7
1.2) Sériové uspořádání pohonu	8
1.3) Paralelní uspořádání pohonu	10
1.4) Kombinované uspořádání pohonu.....	11
1.4.1) Mechanický dělič výkonu a pohon:	12
1.4.2) Elektrický dělič výkonu:	12
1.5) Technologie provozu a řízení hybridního vozu.	14
2) Možnosti akumulace energie - Akumulátor	15
2.1) Elektrochemický akumulátor	16
2.1.1) Porovnání parametrů elektrochemických akumulátorů	16
2.2) Superkapacitor	16
2.3) Setrvačnick	17
2.4) Hydraulický a pneumatický akumulátor	17
2.5) Shrnutí k jednotlivým typům akumulátoru.....	18
3) Přehled vybraných hybridních vozidel	19
3.1) Hybridní posunovací lokomotiva ČKD 718.5 (TA 436.05)	19
3.2) Hybridní posunovací lokomotiva TEM35	21
3.3) Hybridní motorový vůz KIHA E200 a HB-E300	23
3.4) Hybridní PowerPack společnosti MTU	24
3.5) Hydraulický hybridní systém společnosti Voith - HydroBrid	26
4) Tachogram	28
4.1) Trať 295 Lipová-lázně – Javorník ve Slezsku	28
4.1.1) Technický popis trati.....	28

4.1.2) Úprava trati pro potřebu výpočtů	30
4.1.2.1) Výpočet odporu oblouku	30
4.1.2.2) Odpor tunelu	31
4.1.2.3) Úprava traťových odporů na redukovaný profil Tratě.	31
4.2) Určení parametrů vozu.....	32
4.2.1) Výkon a hmotnost vozidla	32
4.2.2) Jízdní odpory a součinitel rotujících hmot	32
4.2.3) Trakční charakteristika hybridního motorového vozu	33
4.3) Výpočet tachogramu	37
4.3.1) Výpočet pro dráhový krok 1 m a zrychlení 1 m/s^2	38
4.3.2) Výpočet pro rychlostní krok.....	41
4.3.3) Výpočet interpolace při rychlostním kroku.....	43
4.3.4) Výpočet pro jízdu konstantní rychlosti	44
4.3.5) výpočet při zpomalování	44
4.4) Výsledné tachogramy	45
4.4.1) Rozbor jízdy vozidla vyšlý z tachogramu pro směr do Javorníku ve S.	49
4.4.2) Rozbor jízdy vozidla vyšlý z tachogramu pro směr do Lipové - L.....	50
5) Návrh využití hybridního pohonu	52
5.1) Skladba trakčního obvodu a účinnosti jednotlivých prvků.....	52
5.2) Výpočet spotřeby vozu bez hybridního pohonu.	53
5.2.1) Výpočet spotřeby pro jízdu ve směru Javorník ve S.	56
5.2.2) Výpočet spotřeby pro jízdu ve směru Lipová L.	58
5.3) Výpočet spotřeby vozu s hybridním pohonem.	59
5.3.1) Výpočet spotřeby hybridního vozidla pro jízdu ve směru Javorník ve S.	61
5.3.2) Výpočet spotřeby hybridního vozidla pro jízdu ve směru Lipová L.	63
6) Provozně technické zhodnocení	64
7) Závěr.....	66

8) Seznam použitých pramenů.....	67
9) Seznam příloh.....	71
10) Poděkování	72

Úvod

V dnešní době je na ekologii a ekonomii provozu jakéhokoliv vozidla kladen velký důraz.

Ekonomicky jsou vozidla s ekologičtějším provozem zvýhodňovány jak na daních, tak i na poplatku za použití dopravní cesty jak v silniční, tak železniční dopravě. Příkladem může být nižší silniční daň, nebo výše mýtného pro motorová vozidla splňující nejnovější emisní normy. Trend finančního zvýhodňování ekologičtějších vozidel platí i na tratích SŽDC, kde je například pro vozidla motorové trakce, neplnící emisní normu EURO 2 a vyšší, zaveden koeficient 1,25 pro zvýšení poplatku jedoucího vozidla po elektrifikované trati. [1] Další ekonomický přínos u ekologických vozidel je zpravidla menší spotřeba, díky které se dá ušetřit na palivu. Ekonomickou nevýhodou nových technologií je jejich cena. U hybridních vozidel je to především cena vhodného akumulátoru.

V pozemní dopravě patří železnice, zvláště elektrická trakce k těm nejekologičtějším. Na provozně málo vytížených tratích se elektrifikace tratí a jejich provoz a údržba z ekonomického hlediska nevyplatí. Proto by mohla být hybridní technologie zajímavou jak ekonomickou tak ekologickou alternativou.

Ve své práci se zabývám především ekologickou úsporou a to zejména o kolik se sníží spotřeba paliva při zavedení hybridní technologie do motorového vozu.

V této práci navrhnu parametry, které by mělo splňovat moderní vozidlo pro regionální dopravu. Vypočtu pro vozidlo spotřebu paliva bez hybridního systému a s hybridním systémem. Tyto údaje porovnám a měly by být výsledkem práce.

1) Princip funkce hybridního pohonu.

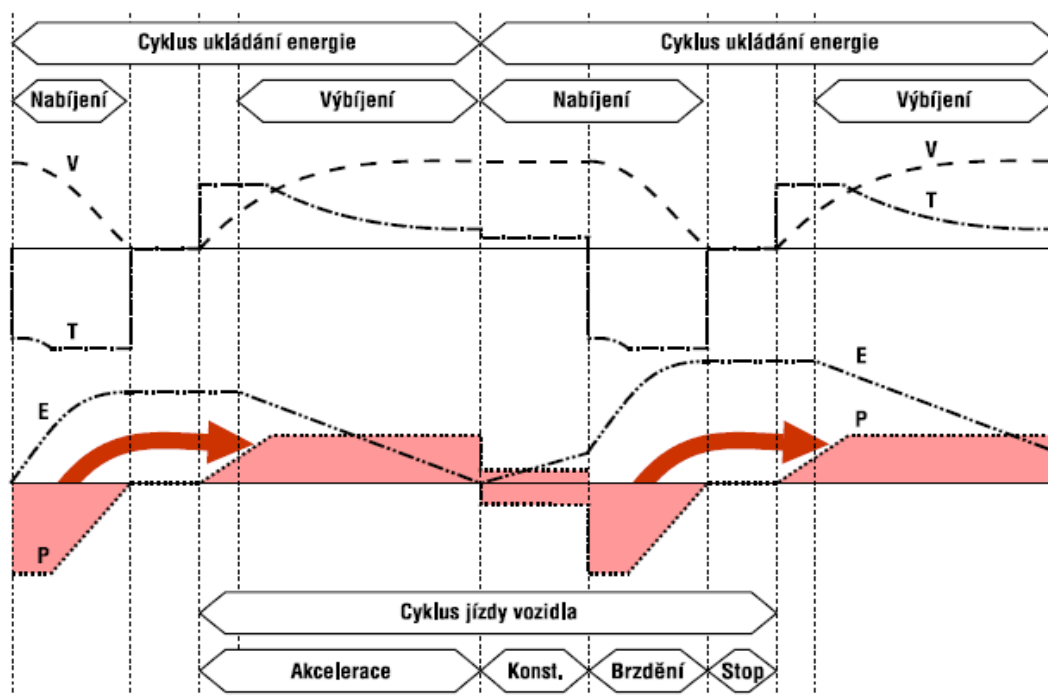
Hybridní pohon je určen využitím dvou a více zdrojů energie pro pohon dopravního prostředku. Nejčastěji fosilního paliva spalovaného ve spalovacím motoru a elektrické energie ukládané v akumulátorech. Díky této kombinaci můžeme využít akumulátory na ukládání elektrické energie vznikající při brzdění rekuperací. Nakumulovanou energii pak můžeme použít na:

- jízdu bez použití spalovacího motoru, na spádu a tam, kde je potřeba omezit hlučnost nebo zplodiny
- zvětšení tažné síly, tím pádem i zrychlení rozjíždějícího vozidla
- úsporu paliva při požadavku plného výkonu (motor bude vytěžován v bodě nejmenší měrné spotřeby)
- na vlastní spotřebu a spotřebu pomocných pohonů vozidla při zhasnutém spalovacím motoru)

Díky nakumulované energii v bateriích, můžeme u motorového vozu navrhnout menší a méně výkonný spalovací motor, který bude mít:

- menší hmotnost
- menší volnoběžnou spotřebu
- menší pořizovací náklady a náklady na údržbu (automobilové spalovací motory vyráběné ve velkých sériích, dostatek náhradních dílů vyráběných i v druhovýrobě)

Na obrázku vidíme princip funkce hybridního vozidla v závislosti na čase. Při rozjezdu využijeme energii akumulátoru (uvažujeme, že akumulátory byly nabity buď, z motorgenerátoru, ze sítě, nebo předchozím rekuperačním brzděním), takže se motorový vůz může rozjíždět pouze pomocí energie z baterií, nebo pomocí spalovacího motoru a energie z baterií, nebo čistě jen na spalovací motor, ale tento stav není žádoucí a nastal by zřejmě při nějaké poruše. Při jízdě konstantní rychlostí bude záležet na kapacitě akumulátorů a traťovém profilu. Mohou nastat tyto případy, nabíjení akumulátoru rekuperačním brzděním, nabíjení akumulátoru pomocí motorgenerátoru a při dostatečné kapacitě akumulátoru a příznivém profilu tratě k jízdě na akumulátorový pohon. Při snižování rychlosti by mělo být upřednostňováno rekuperační brzdění, které by vyrobilo energii pro následující rozjezd, napájení pomocných pohonů a vlastní spotřebu motorového vozu při stání.



Obr. 1 Graf vývoje jednotlivých veličin v průběhu jízdy hybridního vozidla [2]

(V- rychlost, T- trakční síla, P- výkon, E-energie akumulátoru)

1.1) Uspořádání hybridního pohonu

Hybridní pohony se dají dělit dle několika kategorií podle funkce sekundárního zdroje energie v pohonu vozidla. [3]

- *Micro hybrid* – Nejedná se o plnohodnotný hybridní pohon, který by používal pro trakci dva a více zdrojů energie. Takto označované vozidlo má společný startér a generátor (dnes nejčastěji alternátor), jenž je díky němu umožněn start a stopnutí motoru při krátkém zastavení. Tento systém se také nazývá Stop&Start.
- *Mild hybrid* – U tohoto systému je primární zdroj určen pro pohon vozidla, sekundární zdroj umožňuje rekuperaci energie, která je pak využívána k zvětšení výkonu vozidla při akceleraci a k napájení vlastní spotřeby a pomocných pohonů.
- *Full hybrid* – Tento systém umožňuje jízdu jak čistě na energii z akumulátoru, tak jízdu čistě na spalovací motor a jejich kombinaci. Full hybridy mají ještě podskupinu plug-in hybrid, kde se dají elektrické akumulátory dobíjet ze sítě, vyplatí se pouze při dostatečné kapacitě akumulátorů.

Obvykle je primární zdroj založen na čerpání energie z fosilních paliv, zatímco sekundární disponuje energií, jež může být získána třemi základními způsoby – ze zdroje

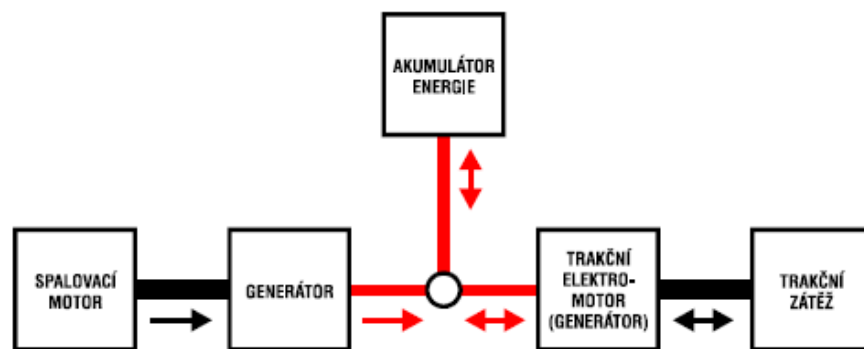
na fosilní paliva, uchováváním energie vznikající při brzdění, nebo z externího stacionárního zdroje. Hybridní pohony mohou mít různé uspořádání prvku v energetickém toku pohonu. Odlišné uspořádání pohonu se používá z důvodů použití různých přenosů výkonu. Dva základní řetězce uspořádání hybridního pohonu jsou sériový a paralelní, popřípadě třetí kombinovaný. Téměř bez ohledu uspořádání pohonu můžeme při sestavování hybridního pohonu vybírat zdroje energie a typ přenosu výkonu z několika základních variant [2].

- Motor (primární zdroj)
 - Spalovací motor
 - Palivové články
 - Palivová turbína
 - Energie z trolejového vedení / třetí koleje
- Akumulátor energie (sekundární zdroj)
 - Elektrochemická akumulátorová baterie (různých typů)
 - Setrvačník
 - Superkapacitor
 - Hydraulický akumulátor
- Přenos trakčního výkonu (použitelné v hybridním pohonu)
 - Elektrický
 - Hydraulický
 - Mechanický
 - Smíšený (hydromechanický elektromechanický aj.)

1.2) *Sériové uspořádání pohonu*

Sériové uspořádání hybridního pohonu je vhodné pro vozidla s elektrickým přenosem výkonem, jelikož se tento systém pohonu liší jen tím, že navíc obsahuje akumulační jednotku energie. Sériové uspořádání hybridního pohonu se skládá motorgenerátoru, regulace, akumulační jednotky a elektrického trakčního motoru. Blokové schéma zapojení viz obr. 2. Vozidlo se sériovým uspořádáním hybridního pohonu řadíme do kategorie Full – hybrid, což znamená, že vozidlo je schopno jet jako konvenční vozidlo čistě pomocí spalovacího motoru, nebo může jet jen na energii z akumulátorů, jako akumulátorové vozidlo. Dojezd je omezen energií uloženou v palivu a v akumulátorech. Jízdní režimy mohou být následující. [4]:

- Čistě akumulátorový provoz, kde energie z akumulátoru jde přes regulaci přímo na trakční motor.
- Čistá jízda pomocí energie vyrobené v motorgenerátoru, která jde přes regulaci na trakční motor.
- Jízda, při níž využívá trakční motor energii z akumulátoru i motorgenerátoru. V tomto režimu je spalovací motor využíván v optimálním výkonu, kde má nejmenší měrnou spotřebu paliva.
- Režim částečného, nebo plného nabíjení akumulátoru energie z motorgenerátoru, případně dodávání energie i trakčnímu motoru. Cílem je udržovat spalovací motor v optimálním výkonovém spektru.
- Rekuperační brzdění, při němž se trakční motor chová jako generátor. Energií se nabíjí akumulátory.
- Nabíjení akumulátorů pomocí motorgenerátoru i rekuperačního brzdění.



Obr. 2 – Sériové řazení hybridního pohonu.[2]

Za výhody tohoto uspořádání hybridního systému můžeme zmínit:

- Využívání spalovacího motoru v jeho nejefektivnějším spalovacím bodě, kdy bude mít nejmenší měrnou spotřebu paliva.
- Elektrický trakční motor může mít hyperbolickou (dokonalou) trakční charakteristiku. Trakční motor může pracovat v širokém spektru otáček s libovolnou trakční charakteristikou. Díky této vlastnosti v přenosu výkonu odpadá převodovka.

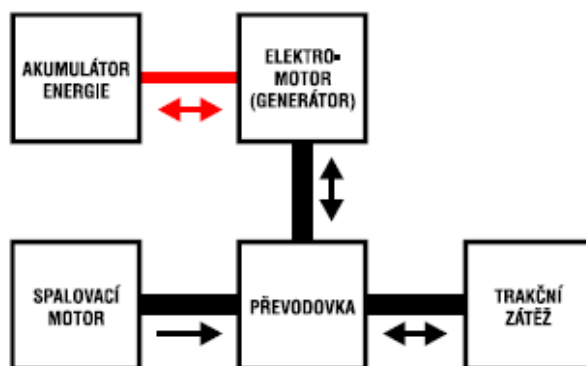
Nevýhody sériového uspořádání hybridního pohonu:

- Menší účinnost přenosu z důvodů dvojí přeměny energie (z mechanické na elektrickou na generátoru a z elektrické na mechanickou na trakčním motoru).

- Větší počet prvků v přenosu výkonu a z toho vyplývající větší náročnost na prostor, větší váha a cena.

1.3) Paralelní uspořádání pohonu

Paralelní uspořádání hybridního pohonu je vhodné pro vozidla s převodovkou, kde můžeme využívat mechanický přenos výkonu, hydromechanický přenos výkonu a hydrodynamický přenos výkonu. U tohoto systému hybridního pohonu se v praxi používá ke spalovacímu motoru jako druhá energie nejen elektřina, ale i tlakový systém na principu stlačování plynu nebo kapaliny. Vývojem a použitím tlakových systémů na uchování energie v dopravní technice se zabývá například společnost Voith Turbo GmbH, nebo Bosch rexroth AG. Avšak v automobilovém průmyslu je nejrozšířenější verze první, tedy spolupráce s elektřinou ve verzi Mild hybrid, kde není sekundární zdroj energie plně zastupitelný primárním zdrojem energie, tedy slouží k zvětšení rozjezdové síly a k rekuperačnímu brzdění. Vozidla s paralelním pohonem mohou samozřejmě využívat energii z akumulátorů, nebo spalovacího motoru zvlášť, ale pro požadované dynamické vlastnosti vozidla by musel být trakční motor a též i spalovací motor konstruován pro větší výkony. Toto řešení by přineslo zvětšení hmotnosti, a zástavbových rozměrů. [4]:



Obr. 3 – Paralelní řazení hybridního pohonu.[2]

Za výhody tohoto uspořádání hybridního systému můžeme zmínit:

- Větší účinnost přenosu výkonu, než u elektrického přenosu výkonu.
- Elektrický motor může posloužit jako startér spalovacího motoru.
- Vhodné i pro jiné než na elektrické energii, fungující akumulátory energie.

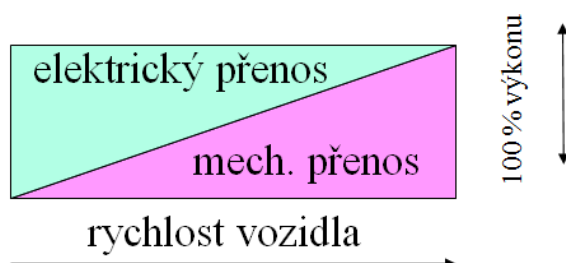
Nevýhody sériového uspořádání hybridního pohonu:

- Složitější uspořádání pohonu oproti sériovému uspořádání pohonu.

- Použitelné v praxi jen se spalovacím motorem.

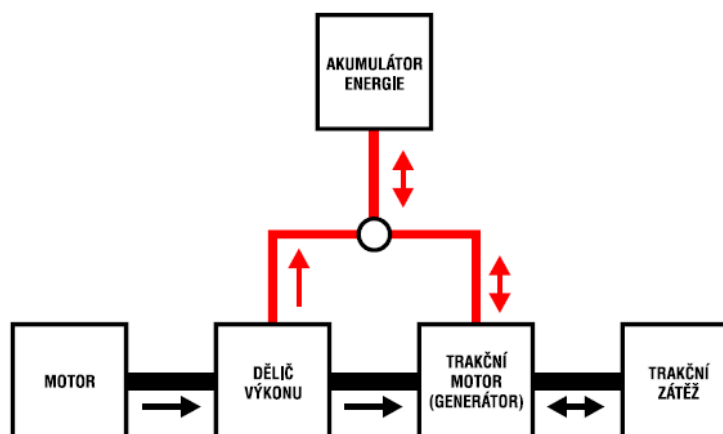
1.4) Kombinované uspořádání pohonu

Kombinované uspořádání se skládá z elektrické a mechanické části. Hlavní předností kombinovaného hybridního pohonu je, že se snaží využít to nejlepší z elektrického i z mechanického přenosu výkonu. To znamená ideální trakční hyperbolu elektrického přenosu výkonu a relativně vysokou účinnost mechanického přenosu výkonu. Toto řešení využívá výkonového děliče. Výkonový dělič může být mechanické konstrukce, nebo elektrické konstrukce. Dělič výkonu funguje tak, že rozjezd vozidla je čistě pomocí elektrického přenosu výkonu a postupně se zapojuje mechanická vazba, dokud nebude přenos výkonu čistě mechanický. Průběh poměru přenášeného výkonu je zaznamenán na obr. 4.



Obr. 4 Poměr zastoupení různého přenosu výkonu k výkonu spalovacího motoru. [5]

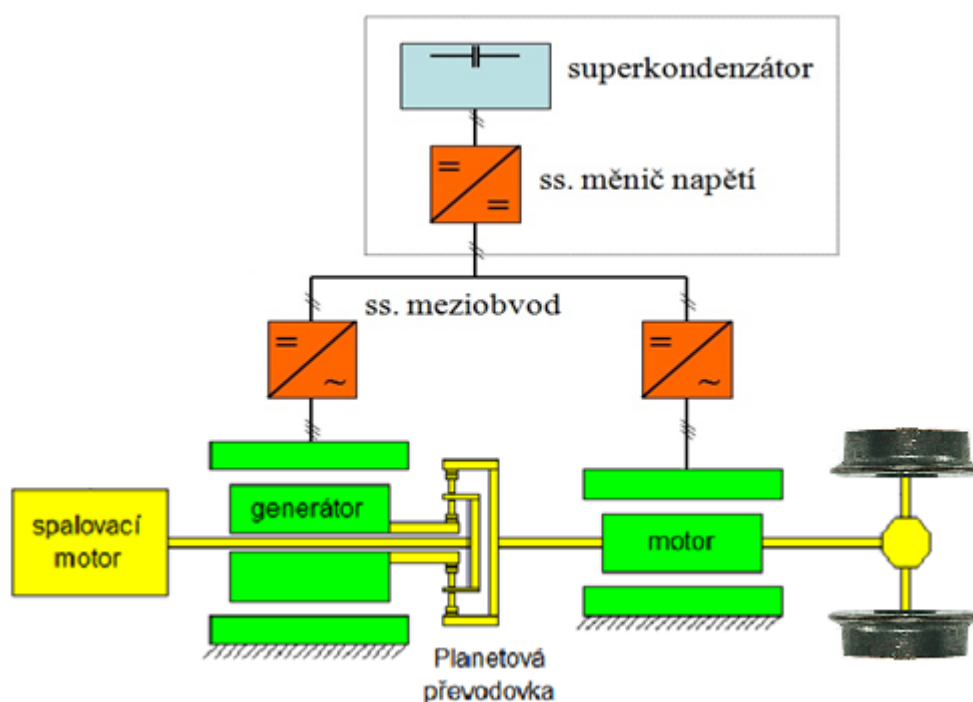
Kombinovaný systém hybridního pohonu se skládá ze spalovacího motoru, děliče výkonu (elektrický, nebo mechanický), elektrické a mechanické vazby, akumulátoru, trakčního motoru/generátoru a převodu viz obr. 5.



Obr. 5 Princip funkce kombinovaného hybridního systému. [2]

1.4.1) Mechanický dělič výkonu a pohon:

Skládá se z generátoru, který je běžné konstrukce, mimo rotoru, který je průchozí a prochází jím hřídel na unášec planetového diferenciálu. Rotor generátoru je spojen s planetou. Koruna je spojena s hřídelem, který je společný pro rotor trakčního motoru a pro převod na nápravu. Elektrická cesta vede od generátoru třífázovým vodičem přes střídač až na trakční motor. Při rozjezdu je koruna planetové převodovky „zabrzdněna“ od stojících kol, to znamená, že je využíván pouze elektrický přenos výkonu. Při rozjezdu stoupají otáčky koruny a klesají otáčky generátoru, který je spojen přes satelity s planetou. Toto poměrné přenášení výkonu mechanickou cestou vůči elektrické cestě stoupá, dokud se nesrovnají otáčky spalovacího motoru a otáčky koruny planetového diferenciálu. Po srovnání otáček spalovacího motoru a otáček koruny planetového diferenciálu se planeta vůči koruně prakticky neotáčí, to znamená, že se rotor generátoru neotáčí a výkon je přenášen pouze mechanicky viz obr. 6. Tento mechanický dělič výkonu byl použit u japonského automobilu Toyota Prius. [5] [6]

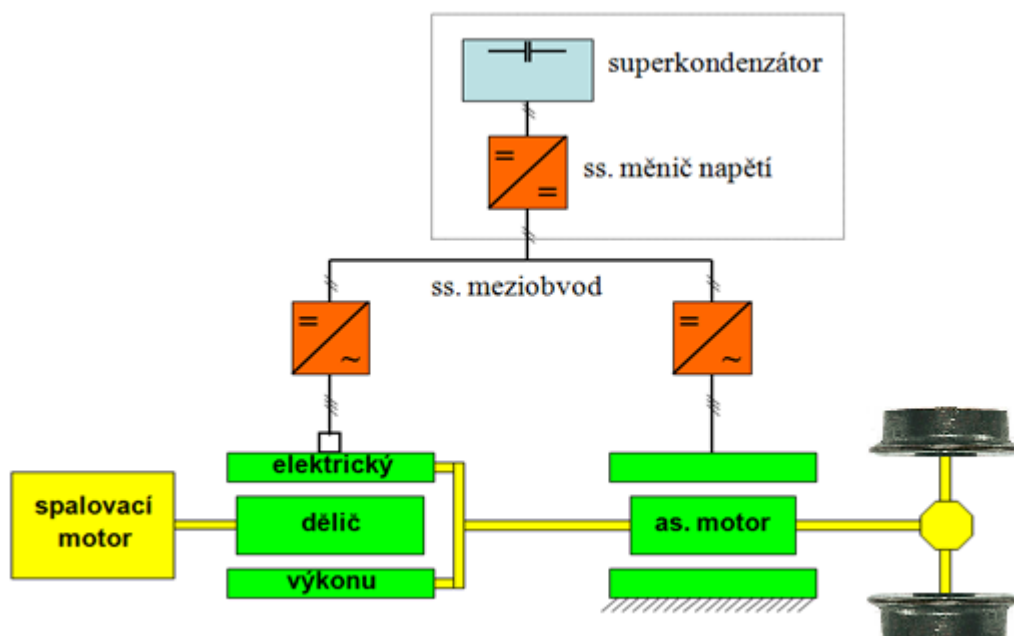


Obr. 6 mechanický dělič výkonu. [5]

1.4.2) Elektrický dělič výkonu:

Elektrický dělič a přenos výkonu se skládá z motoru (v dnešní době převážně asynchronního) střídače usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu usměrňovače a elektrického děliče výkonu. Vlastní elektrický dělič výkonu je tvořen speciálním

elektrickým strojem s rotujícím statorem i rotorem. Rotor je spojen s hřídelí spalovacího motoru. Hnací moment spalovacího motoru se přenáší přes vzduchovou mezeru elektromagnetickými silami na stator. Rotující stator je spojen přes trakční motor s převodem na nápravu vozidla. Při rozjezdu vozidla, když je jeho rychlost ještě nulová, se celý výkon spalovacího motoru přeměňuje v elektrickém děliči výkonu na elektrický výkon. Při urychlování vozidla klesají rozdílné otáčky mezi rotorem a statorem, a v důsledku toho se sníží elektrický výkon děliče a trakčního motoru. Zbývající část výkonu spalovacího motoru se elektromagnetickými silami přenáší přes vzduchovou mezeru na stator a dále na točící se výstupní hřídel pohonu. S narůstající rychlostí vozidla se zvyšuje část přenášená mechanicky, zatímco elektricky přenášená část tomu úměrně klesá. Výsledkem je snižování ztrát v elektrických strojích. [7]



Obr. 7 elektrický dělič výkonu. [5]

Elektrický dělič výkonu byl u nás použit na expresních motorových vozech M290 slovenská střela vyrobených ve dvou exponátech Kopřivnickou Tatrovou v roce 1936. Elektromechanický přenos výkonu navrhl Ing. Josef Sousedík. V současnosti se výzkumem v oblasti elektrického děliče výkonu zabývá katedra elektrických pohonů a trakce ČVUT Praha. [5]

1.5) Technologie provozu a řízení hybridního vozu.

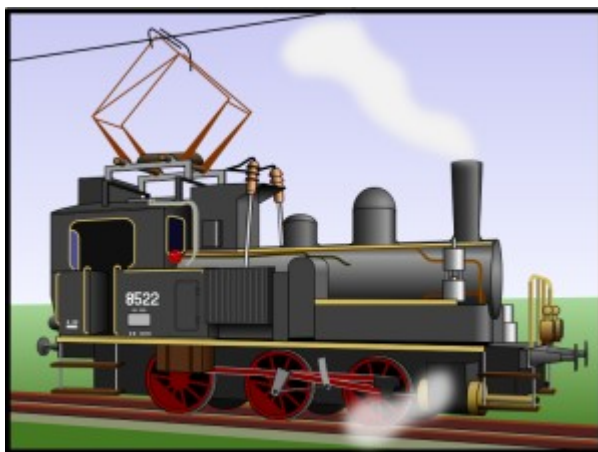
Nepatrné odlišnosti v technologii provozu jsou způsobené odlišným způsobem uspořádání hybridního pohonu. Obecně se dá říci, že se jedná zejména o využívání spalovacího motoru v režimu nejmenší měrné spotřeby, a když není potřeba výkonu spalovacího motoru, aby se jízda odehrávala v akumulátorovém režimu. Dále se jedná o maximální naakumulování brzděné energie do akumulátorů, vznikající při zastavování vozu, nebo udržení stále rychlosti na spádu.

Dnešní systémy jako automatické vedení vlaku, které znají jízdní profil tratě a díky GPS navigaci i okamžitou polohu vozidla na vedlejších tratích, mohou vést k lepšímu využívání spalovacího motoru a čistě akumulátorového režimu jízdy. Tento systém pomáhá zlepšit již dnes energetickou bilanci konvenčních vozidel. Konvenční vozidla, které mají rekuperaci se v podstatě chovají jako hybridní vozidla, jen musí mít zajištěný odběr v síti, případně napájí alespoň svou vlastní spotřebu.

Hybridní motorový vůz by měl mít takovou velikost akumulátorů, aby do nich mohl uložit veškerou energii, která bude vyprodukována elektrodynamickým brzděním při souvislé jízdě po spádu, nebo zastavování do stanice popřípadě zastávky.

2) Možnosti akumulace energie - Akumulátor

Akumulátor je technické zařízení k uchovávání energie. Akumulátor je sekundární článek, který je potřeba nabít a teprve potom je možné jej použít jako zdroj energie. Na rozdíl od sekundárních článků (akumulátorů) primární články dodávají energii ihned po svém sestavení a zpravidla je není možné dobíjet, tyto články nazýváme baterie. [8] Dnes akumulátory tvoří nejčastěji baterie pracující na principu přeměny chemické energie na elektrickou a naopak při nabíjení. Další velkou a dnes rychle se rozvíjející technikou na uchování elektrické energie jsou superkapacitory. Superkapacitory jsou kondenzátory s velkou kapacitou, fungující na principu uchování elektrického náboje mezi desky. Další skupinou jsou mechanické akumulátory, tyto akumulátory fungují na principu uchování potenciální, nebo kinetické energie. Do této skupiny můžeme zařadit od přečerpávacích elektráren, přes setrvačníky, až po tlakové nádoby na stlačený plyn, nebo kapalinu. Jako poslední typy akumulátorů, které se využívaly v dopravě, jsou akumulátory tepelné. U nás existuje akumulční lokomotiva provozovaná na vlečce společnosti Setuza. Ve Švýcarsku existovala hybridní akumulční lokomotiva obr. 8. Podnětem byla malá účinnost parní lokomotivy při posunu, proto se voda v lokomotivě ohřívala pomocí topných těles využívajících elektrickou energii v trolejovém vedení. Poslední akumulátory, které jsou ve vývoji a v praxi se zatím nepoužívají, se nazývají jako magnetické akumulátory. Tyto akumulátory jsou označovány jako SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage. Základem takového zařízení je toroidní supravodivá cívka, kterou téměř beze ztrát protéká velký stejnosměrný proud. [8] [9] [10]



Obr. 8 Animace švýcarské hybridní lokomotivy SBB E 3/3. [10]

2.1) Elektrochemický akumulátor

Elektrochemický akumulátor je jeden z nejstarších a nejběžnějších typů akumulátorů, se kterým se nejčastěji v životě člověk potká. Elektrochemický akumulátor pracuje na elektrochemickém principu změny energie, což znamená, že procházející proud vyvolá vrtané chemické změny v galvanickém článku. Galvanický článek se skládá ze dvou elektrod, kladné a záporné, a z elektrolytu. V elektrolytu se nachází pohyblivé ionty, které jsou nosičem buď kladného, nebo záporného náboje. Jelikož napětí na článku elektrochemického akumulátoru relativně malé (okolo 1,2 – 3,7 V), jsou tyto články spojovány do sériového zapojení pro dosažení vyššího napětí. Pro využití v hybridních pohonech se elektrochemické akumulátory vyznačují nízkým měrným výkonem a dlouhými nabíjecími časy způsobené zdlouhavou elektrochemickou přeměnou. V dnešní době existuje na trhu spousta druhů elektrochemických akumulátorů. V následujících podkapitolách jsou uvedeny základní charakteristiky dnes nejpoužívanějších typů elektrochemických akumulátorů [2] [11].

2.1.1) Porovnání parametrů elektrochemických akumulátorů

Technologie: Parametr:	Pb	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Pol	LiFe(Y)PO ₄
Specifická hustota energie:	40 Wh/kg	70 Wh/kg	100 Wh/kg	180 Wh/kg	250 Wh/kg	150 Wh/kg
Volumetrická hustota energie:	50 Wh/l	100 Wh/l	150 Wh/l	250 Wh/l	330 Wh/l	220 Wh/l
Vybíjecí proud:	< 5C	< 30 C	< 20 C	< 20 C	45 / 60 C	30 / 60 C
Nabíjecí proud:	< 1 C	1 - 5 C	1 - 2 C	1 C	1 - 6 C	1 - 5 C
Nominální napětí:	2V	1.2V	1.2V	3.6V	3.7V	3.3V
Počet cyklů:	500	1000	800	<1000	<1000	<2000

Obr. 9 Přehled vybraných parametrů moderních elektrochemických akumulátorů. [12]

Hodnota 1C u nabíjecího a vybíjecího proudu se rovná hodnotě kapacity akumulátoru v Ah. [12]

2.2) Superkapacitor

Superkapacitor je poměrně nový prvek na trhu, který řeší neduhy elektrochemických akumulátorů, jež mají omezené možnosti akumulovat, nebo podávat velké výkony za krátký čas. Superkapacitor je ve svém principu elektrolytický kondenzátor. Superkapacitor dosahovat obrovské kapacity v řádu stovek až tisíců faradů. Provozní napětí pohybuje mezi

2,3 – 2,7V. Superkapacitor dosahuje vysoké energetické hustoty (jednotky Wh/kg) a velké výkonové hustotě (jednotky až desítky kW/kg), jenž je dána velkými vybíjecími a nabíjecími proudy, díky svému malému vnitřnímu odporu. Účinnost superkapacitoru bývá až 98 %. Životnost dosahuje 500 000 – 1 000 000 cyklů. [2] [13] [14]

2.3) Setrvačník

Setrvačník je těleso, které akumuluje kinetickou energii. Je to rotační zařízení nejčastěji ve tvaru válce, nebo dutého válce, kde využíváme momentu setrvačnosti válce. Setrvačník má dlouhou životnost a pracuje bez chemikálií. Jeho funkce bývá většinou podobná jako u superkapacitorů, a to pohlcovat výkonové špičky při rozjezdu a zastavování.

Energie uložená v setrvačníku se spočítá dle vzorce (1), v praxi je využitelných jen 75% energie, jelikož setrvačník má minimální pracovní otáčky.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot \omega^2 \quad (1)$$

E_k = kinetická energie [W]

I_m = moment setrvačnosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

ω = uhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

$$I_m = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (2)$$

m = hmotnost tělesa [kg]

r = poloměr tělesa [m]

U setrvačníku se uvádí energetická kapacita mezi 2 až 12 kWh. Energetická hustota se uvádí až 20 kWh/m^3 . Doba nabíjení a vybíjení se řadí mezi superkapacitory a elektrochemické akumulátory. Životnost setrvačníku se pohybuje až do výše 5 miliónu cyklů, které odpovídají až 20 letům provozu. Účinnost setrvačníku bývá kolem 90%. [2] [15] [16]

2.4) Hydraulický a pneumatický akumulátor

Hydraulické akumulátory nejsou v dopravní technice tak rozšířené jako předchozí akumulátory. V jejich rozšíření u osobních automobilů by měl pomoci koncern

automobilek Peugeot a Citroen, který problematiku vzduchového hybridu studuje. Mnohem dál jsou firmy Bosh a Voith, které mají zkušenosti jak v silniční, tak železniční dopravě.

Hydraulický akumulátor je nádoba, ve které se akumuluje energie stlačováním plynu, nebo se tlak vyvozuje pístem. Konstrukčně jsou kapalinové akumulátory děleny na pružinové, závažové a plynové. Plynové akumulátory dále dělíme na vakové, membránové a pístové. [2] [17] [18] [19] [20]

2.5) Shrnutí k jednotlivým typům akumulátoru

Při výběru vhodného akumulátoru energie do vozidla hraje roli spousta specifických vlastností a parametrů jak samotného vozidla, tak i rychlostní a výškový profil tratě a režim jízdy vozidla. Jednou z nejdůležitějších vlastností je energie akumulátoru [Wh], výkon akumulátoru [W] a účinnost mezi přijatou a odevzdanou energií. Z dalších důležitých vlastností je hmotnost akumulátorů. V našem případě lehkého motorového vozu musí být co nejmenší, aby zbytečně neovlivňovala dynamické vlastnosti vozidla. Na druhou stranu jsou případy, kdy je opak výhodou, například u lokomotivy určené na posun, kde potřebujeme vysokou tíhu vozidla k vyvinutí velké tažné síly. Svou roli hrají zástavové rozměry, chlazení některých akumulátorů, umístění ve vozidle. Pro náš vůz, jedoucí na horské trati je vhodné mít poháněné všechny nápravy a velkou energetickou kapacitu akumulátorů. Proto bych doporučoval elektrický přenos výkonu. Akumulátory energie by měly být kombinací elektrochemického akumulátoru a superkapacitoru. Elektrická energie se pak může použít i pro napájení pomocných pohonů, osvětlení a různých spotřebičů, například klimatizace, osvětlení a různých automatů.

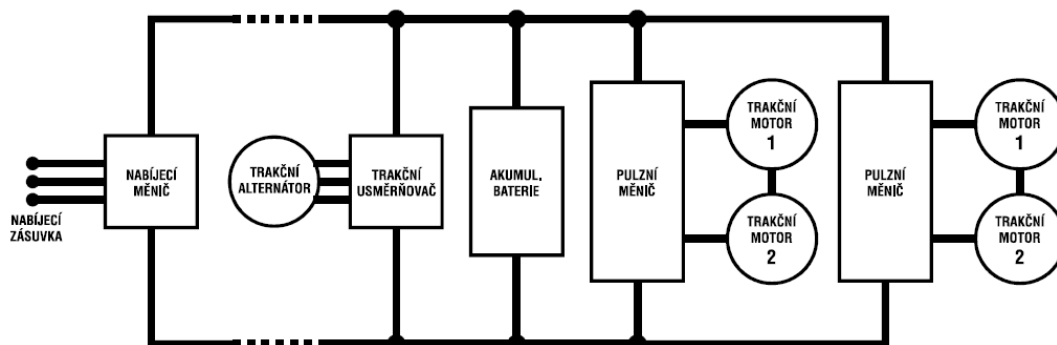
3) Přehled vybraných hybridních vozidel

Hybridní vozidla vznikají již dlouhou dobu. Bohužel jen v pár exemplářích, které většinou slouží jen k ověření nejnovějších technologií. Hlavním problémem je cena hybridního vozidla, která by umožnila jeho sériovou produkci. V automobilovém průmyslu se úspěšně vyrábí hybridní vozidla ve velkých sériích díky štědrým statním dotacím, které snižují cenu vozidla na cenu konvenčního automobilu. Některé státy nabízí různé slevy, nebo úplné osvobození od daní. V následujícím přehledu si ukážeme hybridní železniční vozidla pro posun, která byla vyvinuta, nebo se na jejich vývoji podílel průmysl české republiky a několik zajímavých hybridních vozidel osobní dopravy.

3.1) Hybridní posunovací lokomotiva ČKD 718.5 (TA 436.05)

Díky analýze práce posunovacích lokomotiv, ze které vyplývalo, že až 2/3 pracovního času stráví lokomotiva při volnoběžných otáčkách spalovacího motoru. Jejich střední výkon dosahoval necelých 10 % jmenovitého výkonu. Pracují při maximálním výkonu asi jen 1 až 2 % celkové doby služby, ale potřebují jej. Více než polovina vykonané trakční práce představovala kinetická energie, která byla zmařena brzděním (podíl rekuperované energie u podobné čistě akumulátorové lokomotivy A 219 činil 30 až 45 % při výkonech na posunu). To znamená, že lokomotiva musí mít výkonný spalovací motor, který při volnoběžných otáčkách spalovacího motoru spotřebovává více paliva, než spalovací motor s menším výkonem použitý v hybridní lokomotivě. Díky akumulátorům může lokomotiva rekuperovat brzdovou energii při zpomalování, nebo zastavování. Dobíjení akumulátorů může zajišťovat spalovací motor v optimálním zatížení, to znamená, při krouticím momentu kde má nejmenší měrnou spotřebu.

Lokomotiva byla postavena v první polovině roku 1986. Lokomotiva byla řešena tak, aby se co nejvíce podobala svými parametry v té době sériově vyráběnými lokomotivami řady 730. Jejich výkon na trakčních motorech byl shodný cca 510kW. U řady 730 tento výkon odpovídal jmenovitému výkonu, u řady 718.5 se jednalo o výkon krátkodobý špičkový. Lokomotiva byla řešena tak, aby její pomocné pohony byly elektrické, tím pádem lokomotiva mohla fungovat jako čistě akumulátorové vozidlo. Měla i přípojku 3 x 380 V na dobíjení z vnější sítě. Chod všech agregátů lokomotivy je plně automatizován a řízen elektronicky. Na dobu svého vzniku bylo u lokomotivy použito spoustu nových řešení a prvků například zpětné vodivé tyristory a silové tranzistory ČKD.



Obr. 10 Trakční obvod lokomotivy řady 718.[2]

Hlavní technické parametry lokomotivy jsou:

Hmotnost:	64 t
Max. rychlost:	60 km/h
Spalovací motor:	LIAZ – M637
Výkon:	189 kW
Trakční alternátor:	TA 610
Výkon:	150 kW
Trakční akumulátor:	NKS 300
Počet článků:	480
Druh:	nikl – kadmiové
Výkon:	480 kW (krátkodobě)
Energetická kapacita:	172,8 kWh
Jmenovité napětí:	576 V
Jmenovitá kapacita:	300Ah
Hmotnost:	11,5 t

Lokomotiva řady 718.5 byla společně s řadou 730 testována v železniční stanici Olomouc na různých druzích posunu. Přehled úspory paliva bude v následující tabulce.

Druh posunu	spotřeba paliva dm ³ /h		poměr spotřeb
	730	718.5	
Posun na pahrbku	14,92	13,09	0,88
Odrazy a rozvoz zátěže	13,62	10,33	0,76
Přísun k pahrbku	23,53	25,56	1,09
Přetahy zátěže	12,87	10,86	0,84

Tabulka 1. Porovnání spotřeb lokomotiv 730 a 718.5[2] [22]

Z tabulky vidíme, že lokomotiva byla schopna zastat všechny druhy posunu. Nejlepších výsledků lokomotiva dosahovala při odrazech a rozvozu zátěže, kde maximálně využila rekuperační brzdění. Naopak při přísunu zátěže k svažnému pahrbku lokomotiva téměř nevyužívala rekuperačního brzdění a její spalovací motor pracoval v oblasti vyšších výkonů. Úspora paliva dosahovala 20 až 30 %.

Lokomotiva měla dobrou dynamiku posunu, díky téměř okamžitému nástupu plného výkonu akumulátorů. Lokomotiva byla i první lokomotivou bývalých ČSD s elektrodynamickou brzdou, která ukázala značné výhody při posunu. Nejenže přispěla k snazšímu ovládání vozidla, ale i snížila opotřebení brzdových zdrží. To mělo dopad na přechod výroby z řady 730 na modernější řadu 731. K výrobě těchto hybridních lokomotiv bohužel nedošlo z důvodů dnes těžko pochopitelných. Domácí průmysl nebyl schopný vyrábět elektrochemické akumulátory pro tehdejší železniční průmysl a výroba hybridních lokomotiv by zvýšila dovoz akumulátorů ze západních zemí a jeho devizovou náročnost. To rozhodlo ukončení vývoje tohoto zajímavého řešení. [2] [21] [22]

3.2) Hybridní posunovací lokomotiva TEM35

Díky nemalým investicím do obnovy a vývoje lokomotiv v ruské federaci vzniká spousta nových projektů. Jedním z nich je projekt hybridní lokomotivy TEM 35, kterou vyrábí konsorcium firem soustředěný kolem firmy Transmašholding. Hlavním partnerem je společnost CZ LOKO, která z Transmašholdingem spolupracuje již delší dobu. Společnost CZ LOKO zajistila projekční a konstrukční práce a technickou podporu. Kabina a většina kapot byla vyrobena v České republice. Lokomotiva je vybavena spalovacím motorem Caterpillar C 18 o jmenovitém výkonu 571 kW a alternátorem ukrajinské společnosti Elektrotjažmaš Charkov. Jako akumulátor energie slouží superkapacitor ruské společnosti Elton. Superkapacitor na lokomotivě slouží ke krátkodobému navýšení elektrické energie pro trakci nad rámec výkonu dodávaného motorogenerátorem, zejména v méně ekologických a ekonomických režimech spalovacího motoru. Toto řešení umožňuje použití menšího motoru s lepší volnoběžnou spotřebou. Superkapacitor může sloužit jako zdroj pro napájení sítě ostatních pomocných pohonů lokomotivy. Jedna z možností doničení superkapacitoru je rekuperačním brzděním. K regulaci jsou použity IGBT tranzistory. Systém přenosu výkonu je AC/AC. Lokomotiva obsahuje výrobky českých i slovenských výrobců. Usměrňovače pro stejnosměrný meziobvod dodala firma Alfa Union Praha. Ze stejnosměrného obvodu je napájena skříň rozvaděče pomocných pohonů od firmy EVPÚ Nová Dubnica. Trakční střídač pak napájí

každý podvozek, kde jsou v paralelním zapojení tři asynchronní trakční motory o výkonu 180 kVA. Lokomotivní elektronicky regulátor a protismykové zařízení dodala firma MSV Elektronika. Lokomotiva by měla při posunu ušetřit až 40% paliva oproti lokomotivám ČME3 nebo TEM2. Lokomotiva byla představena veřejnosti 1. 3. 2013. Zkušební provoz teprve bude probíhat.

Hlavní technické parametry vozidla jsou:

Hmotnost:	123 t
Maximální rychlost:	100 km/h
Rozchod:	1520 mm
jmenovitý výkon s.m.:	571 kW
Jmenovitý výkon alt.:	545 kVA
Maximální výkon TM v režimu spolupráce motorgenerátoru a superkapacitoru:	683 kW po dobu 55 sekund
Maximální tažná síla:	373 kN



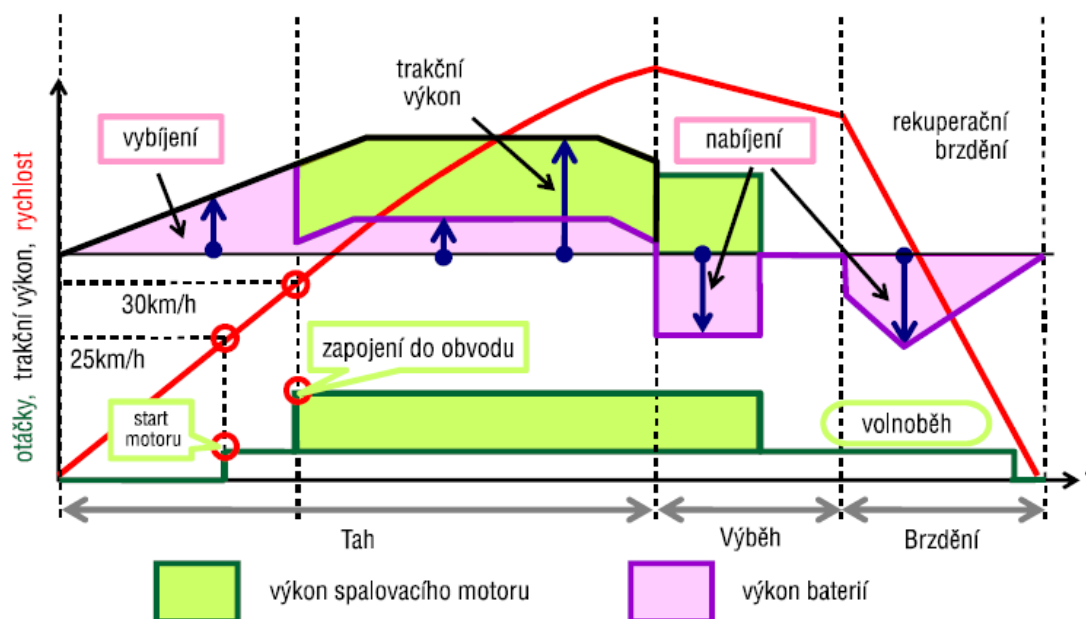
Obr. 11 Lokomotiva TEM35 v areálu litevského VLRD ve Vilniusu.[36]

Lokomotiva TEM35 vznikla jako reakce na konkurenční projekt skupiny Sinara a její hybridní lokomotivu TEM9H (SinaraHybrid).

Lokomotiva TEM9H je čtyřnápravová lokomotiva s maximálním výkonem 882 kW při dodávání výkonu z akumulátorů a motorgenerátoru. Při čistě akumulátorové jízdě mohou dodávat akumulátory výkon 252 kW. Spalovací motor dodává výkon 620 kW. Maximální tažná síla je 253 kN a nejvyšší provozní rychlostí 100 km/h. Lokomotiva je vyrobena modulovou konstrukcí, to znamená, že jednotlivý modul, na kterém vznikne porucha, se vymění za jiný modul stejného typu a vadný se pošle opravit na speciální pracoviště. Na lokomotivě jsou umístěny moduly motorgenerátoru, trakčních měničů, akumulátorů a modul vzduchotechniky. Na lokomotivě je použit synchronní trakční alternátor a asynchronní motory. K akumulování energie je použita kombinace Li-iontových akumulátorů a superkapacitoru, které mohou napájet trakční i pomocné pohony při vypnutém spalovacím motoru. Lokomotiva by měla dosahovat v porovnání s řadou TEM9 o 30 % menší spotřebou paliva a polovičními emisemi výfukových plynů. Řídicí systém bude mít v sobě uložen profil tratě a bude spolupracovat s technologií GLONASS (ruská obdoba americké GPS). Řídicí systém bude během jízdy sledovat parametry jízdy i tratě a tím pádem bude moct předurčovat energetickou spotřebu působením na činnost pohonu a volbu zdroje energie. [23] [24] [25]

3.3) Hybridní motorový vůz KIHA E200 a HB-E300

Japonská železniční společnost East Japan Railway začala v půli roku 2007 používat jako první na světě hybridní dvou vozovou motorovou jednotku KIHA E200 v pravidelném provozu s cestujícími. Vývoj probíhal v režii dopravce na prototypu označovaného NE Train (New Energy Train), kdy funkční prototyp začal najíždět své první zkušební kilometry v roce 2003. Souprava jezdí na trati dlouhé 79,8 km v horské oblasti středního Japonska. Jednotka je vybavena sériovým hybridním pohonem. Spotřeba paliva v porovnání s původní řadou KIHA 110 se snížila o 10% na stejné lince. Maximální úspora paliva byla dosažena v testech a to 20 %. Emise plynů NOx a pevných částic byla snížena až o 60%. U vozidla byl také podstatně snížen hluk. Snížení hluku činí u akceleračního vozidla až 30 dB. Vozidlo má určenou technologii jízdy, kdy spalovací motor dodává výkon až od rychlosti 30km/h. Spalovací motor dodává při jízdě výkon společně s akumulátorem a při požadavku výběhu dále pracuje a částečně dobije akumulátor. Úplné dobití akumulátoru proběhne rekuperačním brzděním. Následující popis je uveden v grafu.



Obr. 12 Graf záznamu jízdy vozidla KIHA E200.[2]

Technické parametry vozidla KIHA E200:

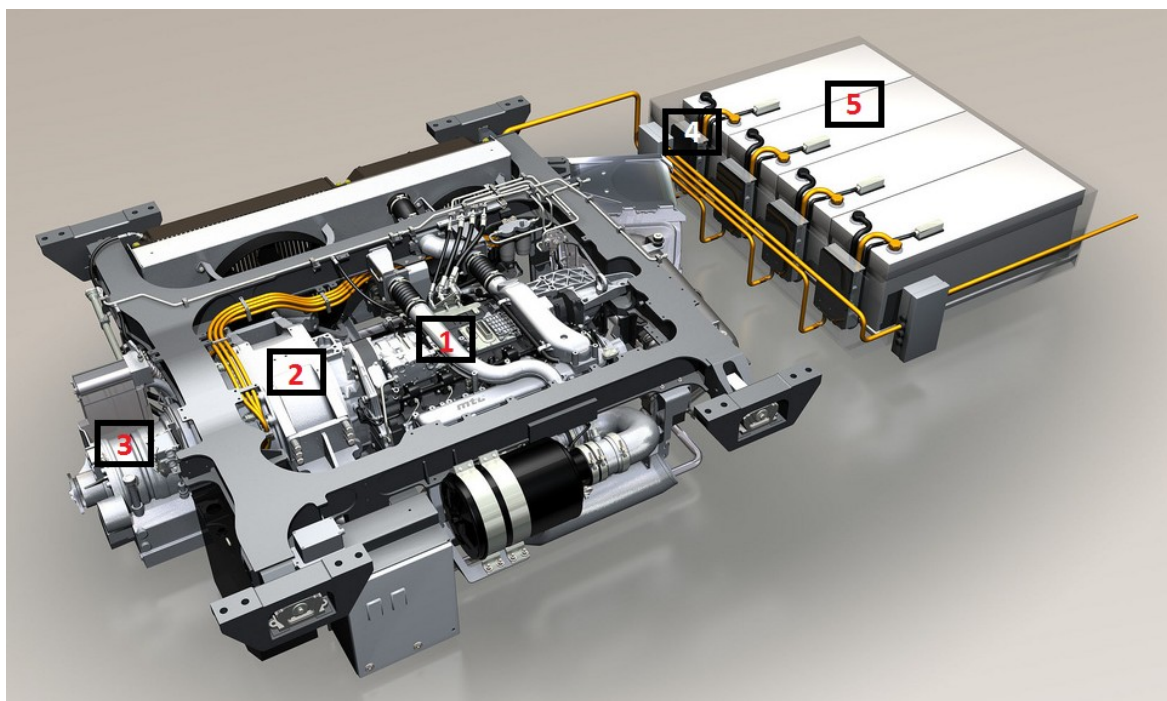
Hmotnost:	cca 40 t
Max. rychlost:	100 km/h
Výkon SM:	340 kW
Výkon TM	2 x 95 kW
Trakční akumulátor:	
Druh:	Li-ion
Výkon:	250 kW

Jednotka KIHA byla vyrobena ve třech exemplářích. V roce 2010 byly vyrobeny další čtyři jednotky pro jiné linky. Jednotky jsou označeny řadou HB-E300 a jsou po technické stránce řešeny stejně jako jednotky KIHA E200. [2] [26] [27] [28]

3.4) Hybridní PowerPack společnosti MTU

Společnost MTU se zabývá vývojem podpodlahových trakčních pohonů uložených v kompaktním modulu, který se nazývá PowerPack. Jedná se o paralelní systém využívající hydromechanický přenos výkonu, který využívá pomocný elektrický synchronní stroj, jenž může sloužit jak v motorovém, tak generátorickém chodu. Společnost nabízí více typů PowerPacků, různých výkonových kategorií.

Základní popis PowerPacku nabízí tento obrázek:



Obr. 13 MTU PowerPack (1) Spalovací motor, (2) Synchronní stroj, (3) Převodovka ZF, (4) AC/DC měnič, (5) Elektrochemické akumulátory.[31]

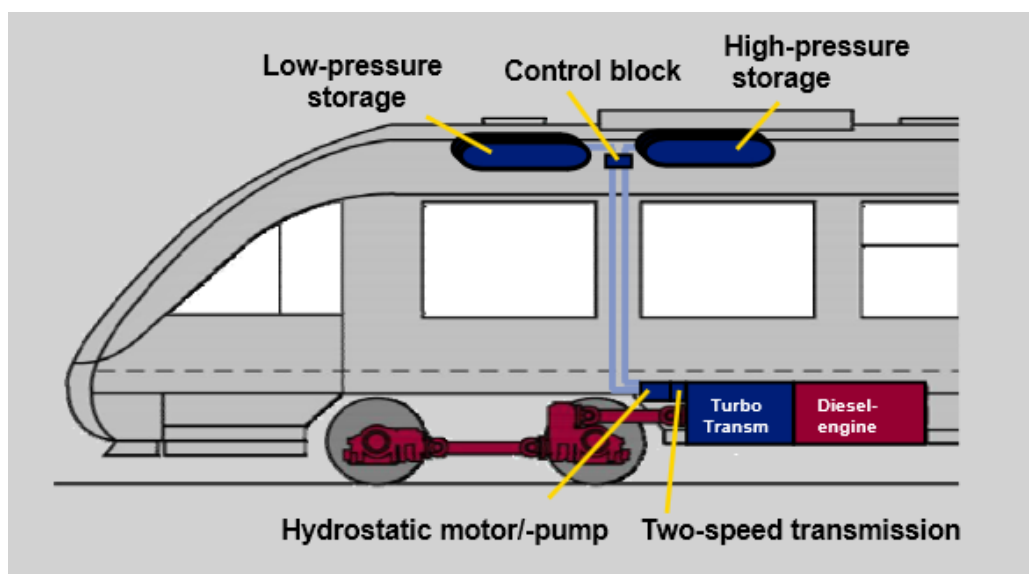
PowerPack samozřejmě obsahuje další nutné komponenty jako například filtry, kompresor, chlazení a podobné. Největší přínos PowerPacků je využití rekuperačního brzdění, kdy se kinetická energie vlaku díky synchronnímu stroji přemění na elektrickou energii a následně se uloží do akumulátorů. Tato energie se pak využije při rozjezdu vlaku, kdy je společně se spalovacím motorem v činnosti i elektrický synchronní stroj v režimu elektromotoru. Při požadavku nižšího trakčního výkonu, nebo při stání vozidla ve stanici, je systém napájen jen z akumulátoru. Díky tomuto řešení lze dosáhnout snížení spotřeby paliva a snížení emisí výfukových plynů až o 25 % oproti standardnímu PowerPacku. Nezanedbatelné je i snížení úrovně hluku.

V motorové dvouvozové jednotce s řadovým označením 642 129 známé pod komerčním názvem Desiro Classic, byly původní powerpacky nahrazeny nově vyvinutými powerpacky MTU. Tyto konkrétní powerpacky se skládají ze spalovacího motoru MTU 6H 1800 R 75, který je nastavený na výkon 315kW. V powerpacku se též nachází elektrický synchronní stroj, který může fungovat jako elektromotor nebo generátor o trvalém výkonu 200 kW. Tento elektrický stroj je přetížitelný po dobu jedné minuty a může být zatěžován výkonem 400 kW a slouží i jako startér motoru. Za elektrickým

točivým strojem je hydromechanická převodovka ZF. K akumulaci energie slouží akumulátory LiFePO₄ (Je to vývojově další nabíjecí akumulátor Li-Ion typu, který používá odlišnou katodu. Tento akumulátor má nepatrně vylepšené vlastnosti ve všech ohledech, nejvíce však oblasti bezpečnosti.) o kapacitě 4,7 kWh, které mohou dodávat výkon až 120kW. Dobíjí se alternátorem, který je poháněn spalovacím motorem, nebo jízdou při rekuperačním brzdění. Jedno z dalších vylepšení, které zvýšilo energetickou účinnost vozidla, je elektricky poháněný kompresor klimatizace a zcela nová klimatizace využívající oxid uhličitý. Hybridní Desiro by mělo oproti konvenčním jednotkám ušetřit za rok až 40 000 l nafty a 105 t emisí CO₂. S provozem vozidla se počítá na horské trati, kde se na 37 kilometrech nachází čtrnáct zastávek a stanic. [29] [30] [32]

3.5) Hydraulický hybridní systém společnosti Voith - HydroBrid

Většina hybridních železničních vozidel využívá k akumulování energie elektrochemické akumulátory. Tyto akumulátory jsou poměrně drahé. Zástavba elektrického stroje, který by sloužil jako motor/generátor u vozidel s mechanickým nebo hydraulickým přenosem výkonu je poměrně složitá. Proto společnost Voith chtěla přijít s poměrně levným a snadno zabudovatelným zařízením, jenž by sloužilo jako paralelní mild hybrid, to znamená, že sekundární zdroj nefunguje jako plnohodnotná náhrada primárního zdroje. Sekundární zdroj by jen akumuloval kinetickou energii z brzdění vozidla a pomáhal by dodávat výkon při rozjezdu vozidla. Tento hybridní systém obsahuje hydraulické zařízení, které může fungovat jako motor nebo čerpadlo, tlakové nádoby a řídicí systém.



Obr. 14 Hydraulický hybridní systém HydroBrid .[33]

Tento systém chce v rámci efektivního nakládání s energií využívat odpadní teplo motoru a výfukových plynů. Jedná o otevřený systém, jenž se dá upravovat dle přání zákazníka. Firma Voith tento systém dále vyvíjí, v budoucnu by chtěla, až budou elektrické akumulátory na technicky a ekonomicky příznivější, přejít na elektrické ukládání energie.

[33]

4) Tachogram

K zjištění chování železničních vozidel potřebujeme tři charakteristické parametry vlaku. Jednou z těchto charakteristik je průběh rychlosti na čase, nebo na ujeté dráze. Tato charakteristika se nazývá tachogram. Při výpočtu tachogramu dopočítáme i zbývající dvě důležité charakteristiky, a to jsou jízdní doba a spotřeba energie při realizaci jízdy.

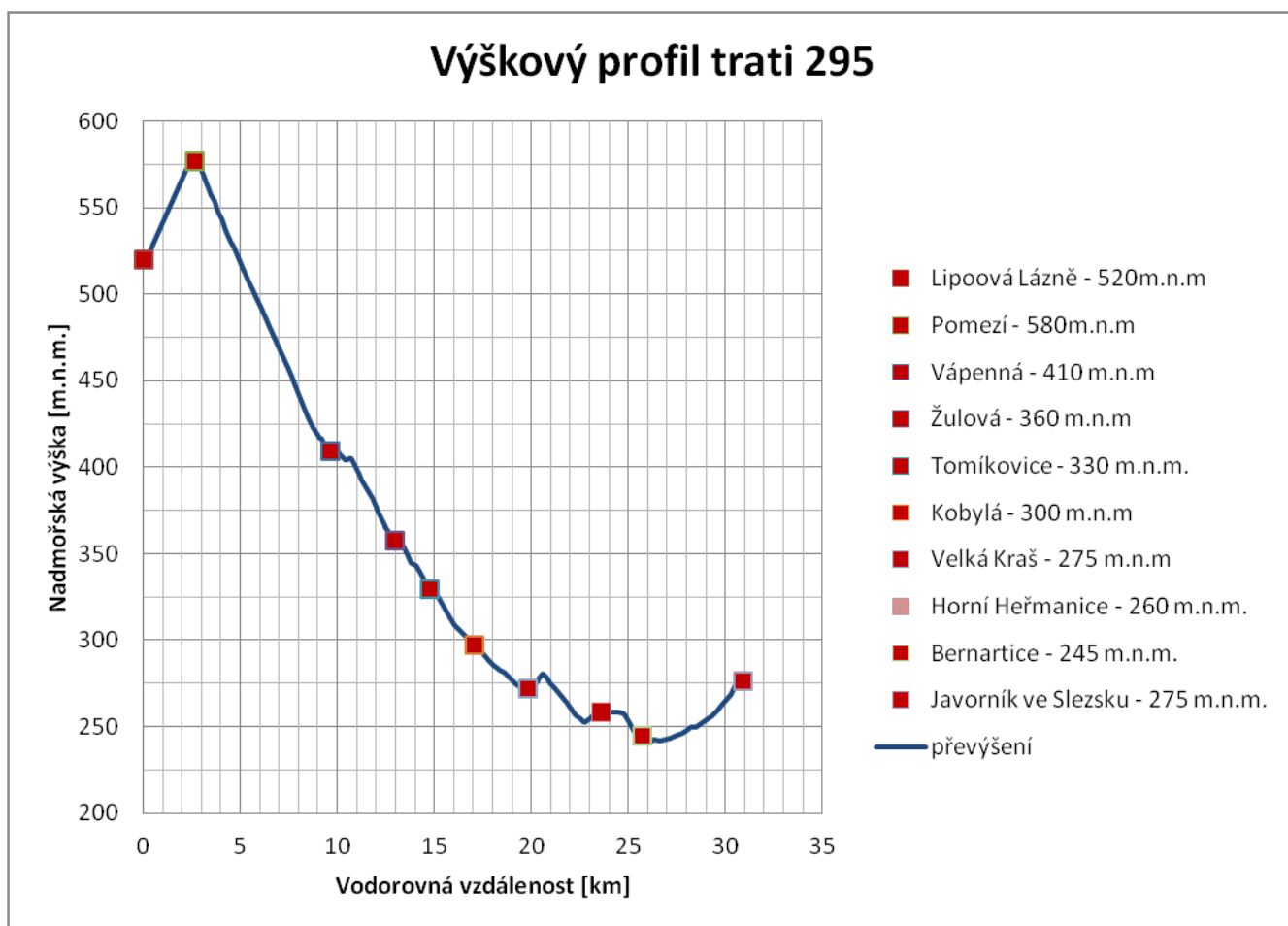
Před provedením výpočtu tachogramu musíme znát trať, po které vozidlo pojede a parametry vozidla. Tyto základní parametry určíme v prvních dvou krocích, ve třetím kroku bude uveden postup výpočtu tachogramu.

4.1) Trať 295 Lipová-lázně – Javorník ve Slezsku

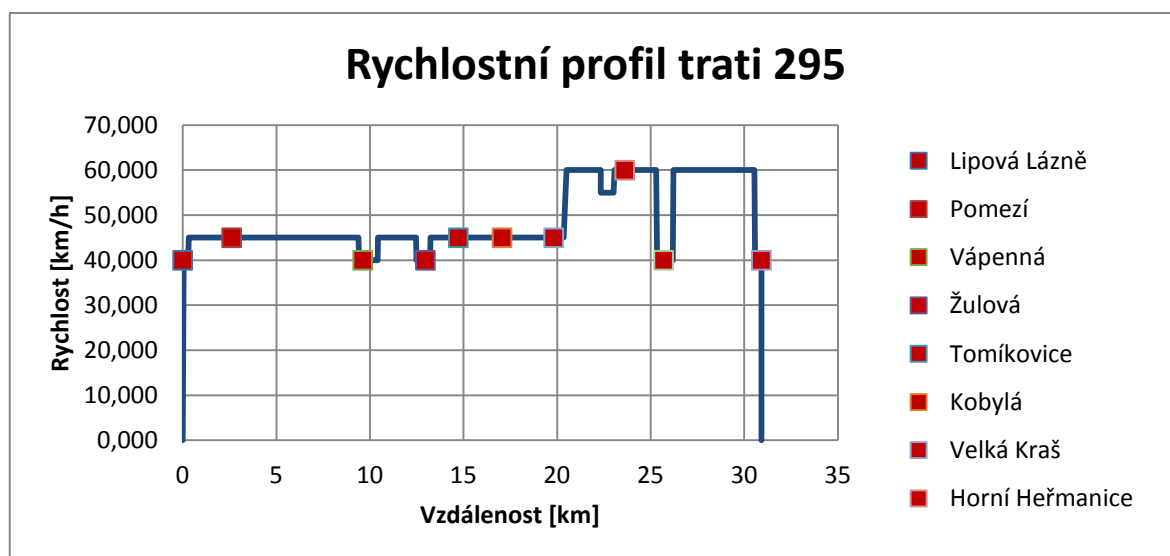
Trať byla stavěna jako odbočná větev ze stanice Lipová-lázně, ležící na dnešní trati číslo 292 Krnov – Šumperk, do Bernartic a dále do dnešního polského Otmuchowa. Na této části trati byl zahájen provoz 2. 7. 1896. Na původní odbočce do Javorníka ve Slezsku byl zahájen provoz 6. 8. 1897. Odbočka z Bernartic do Otmuchowa byla zrušena a následně i vytrhána v roce 1963. V současné době úsek Lipová-lázně – Javorník ve Slezsku tvoří jednu trať. [34]

4.1.1) Technický popis trati

Jedná se o horskou trať, která ze stanice Lipová-lázně, ležící v nadmořské výšce 520 m. n. m., stoupá na vrchol trati, který leží ve stanici Pomezí v nadmořské výšce 580 m. n. m. Ze stanice Pomezí následuje téměř trvalé klesání až do stanice Bernartice, která se nachází v nadmořské výšce 245 m. n. m. Trať dále stoupá do Javorníka ve Slezsku, jehož železniční stanice leží v nadmořské výšce 275 m. n. m. Sklony na trati dosahují téměř 30 promile. Na trati se nachází 103 oblouků nejmenším poloměru 150 m. Na trati se nachází dva protisměrné oblouky a jeden jednokolejný tunel. Tunel měří 105 m a leží v traťovém úseku Lipová-lázně – Pomezí. Traťová rychlost se pohybuje mezi rychlostmi 40 až 60 km/h. Více vypovídá přiložený rychlostní profil tratě. Na trati leží celkem deset stanic a zastávek. Provoz na trati zajišťují sólo motorové vozy řady 810. Při zvýšených přepravních prouděch, zvláště v neděli a v pátek, jsou motorové vozy řady 810 posílené o přípojný vůz řady 010. V pracovní dny je linka obsluhována dvanácti páry osobních vlaků a o víkendech jich jezdí jen devět. Kraj do budoucna plánuje osobní dopravu na této lince zachovat.



Obr. 15 Výškový profil trati 295



Obr. 16 Rychlostní profil trati 295

Dovolená třída tratového zatížení je C3, to znamená maximálně 20 t na nápravu a 7,2 t na běžný metr vozidla.

4.1.2) Úprava trati pro potřebu výpočtů

Pro potřeby výpočtů jsem si od SŽDC vyžádal sklonové, směrové a rychlostní parametry. Ty mi byly ochotně poskytnuty. Z materiálů, které mi byly poskytnuty, určíme všechny traťové odpory a následně z těchto traťových odporů získáme redukovaný profil tratě, který bude potřeba pro budoucí výpočet tachogramu, spotřeby energie a jízdní doby. Úpravy, které jsem musel udělat, byly takové:

Pro přehlednost jsem si upravil kilometrické značení ve stanici Lipová-lázně, které bylo kilometricky značeno dle tratě 292 tak, aby bylo shodné pro stejnou kolej s tratí 295.

U oblouků bylo potřeba upravit přechodnice tak aby, jejich jedna půlka byla brána jako přímá kolej a druhá půlka jako součást oblouků.

4.1.2.1) Výpočet odporu oblouku

Při průjezdu vznikají tečné reakce mezi kolem a kolejnicí, které odchyľují vozidlo z přímého směru. Tyto reakce působí jako pasivní odpor. V praxi se odpor oblouku nahrazuje hodnotou přídavného sklonu. Pro tratě s normálním rozchodem 1435 mm se používá vzorec:

$$s_{obl} = \frac{600}{R} [\text{‰}] \quad (3)$$

$$s_{obl} = \text{přídavný sklon oblouku} [\text{‰}]$$

$$R = \text{poloměr oblouku [m]}$$

U protisměrných oblouků se druhý navazující oblouk vynásobí koeficientem 1,5.

Výpočet prvního řádku tabulky dle vzorce (3) a ukázka tabulky pro 1. oblouk a protisměrné oblouky (vyznačeny žlutě) číslo 63 a 64. [35]

$$s_{obl} = \frac{600}{R} [\text{‰}]$$

Včetně přechodnice								Údaje s půlkou přechodnice.				Protis. oblouk
z. obl. [km]	k. obl. [km]	směr	R [m]	l [m]	Přech. 1 [m]	Přech. 2 [m]	č. obl	z. obl. [km]	k. obl. [km]	l usek. [m]	S _{obl.} [‰]	S _{obl.} [‰]
31,424	31,518	L	211	72,00	11,00	11,00	1	31,430	31,513	83,000	2,84	
15,184	15,349	P	170	87,32	36,04	41,56	63	15,202	15,328	125,800	3,53	
15,349	15,494	L	176	74,87	40,45	30,02	64	15,369	15,479	110,235	3,41	5,11

Tabulka 2. Ukázka tabulky, která se v kompletní podobě nachází v příloze - Excel (redukce sklonu)

$$s_{obl} = \frac{600}{211} = 2,84 \text{ [‰]}$$

4.1.2.2) Odpor tunelu

Ta trati se nachází 105 m dlouhý jednokolejný tunel, jenž působí jízdním odporem na vozidlo. Zvýšený odpor způsobuje víření vzduchu kolem vozidla a vytlačování sloupce vzduchu z tunelu čelem železničního vozidla. Jízdní odpor tunelu je daný pro tunel empirickým vzorcem.

Pro jedno kolejný tunel je jízdní odpor: $\alpha_t = 2 \text{ [‰]}$.

[35]

4.1.2.3) Úprava traťových odporů na redukovaný profil Tratě.

Tento výpočet připočte přídatný sklon oblouku a tunelu ke sklonu tratě. Tato úprava slouží k zjednodušení následných výpočtů trakčních výpočtů.

$$S_r = \frac{s \cdot l + \sum_k s_{obl_k} \cdot l_{obl_k} + \sum_n s_{tun_n} \cdot l_{tun_n}}{l} \quad (4)$$

kde:

s_r = redukovaný sklon tratě [‰]

l = poloměr oblouku [m]

s = sklon sklonového úseku [‰]

s_{obl} = přídatný sklon oblouku [‰]

k = k-tý oblouk ležící na počítaném úseku

l_{obl} = délka oblouku příslušící počítanému úseku [m]

n = n-tý tunel ležící na počítaném úseku

. l_{tun} = délka tunelu příslušící počítanému úseku [m]

Výpočet prvního řádku tabulky dle vzorce (4) a ukázka tabulky redukovaného profilu tratě 295. [35]

$$S_r = \frac{25,73 \cdot (31,483 - 31,424) + \sum 2,84 \cdot (31,483 - 31,429) + \sum 0 \cdot 0}{(31,483 - 31,424)} = 28,3 [\text{‰}]$$

Údaje o trati					Údaje o oblouku s půlkou přechodnice.				
č. usek.	z. usek. [km]	k. usek. [km]	l usek. [m]	Skon [‰]	č. obl.	z. obl. [km]	k. obl. [km]	l usek. [m]	sobl [‰]
6	31,424	31,483	59	25,73	1	31,429	31,513	83	2,84

Tabulka 3. Ukázka tabulky, která se v kompletní podobě nachází v příloze - Excel (redukce sklonu)

4.2) Určení parametrů vozu

Pro výpočet tachogramu musíme znát určité parametry vozidla. Tyto parametry jsou: Výkon na obvodu kola, který můžeme při použití pomaluběžných asynchronních motorů s permanentními magnety nazvat, při zanedbaní ztrát v ložiskách, výkonem trakčních motorů. Dále musíme znát hmotnost vozidla, jízdní odpory vozidla a součinitel rotujících hmot. Tyto parametry jsem si určil dle odborné literatury, nebo odborným odhadem. [36]

4.2.1) Výkon a hmotnost vozidla

Vozidla pro regionální dopravu by měla mít poměrný výkon na tunu vozidla kolem 10 kW/t. Odborným odhadem odhadneme hmotnost vozidla. V současné době jezdí na trati 295 motorový vůz řady 810, jenž má hmotnost 20 t prázdný a 24,4 t obsazený. Obsaditelnost tohoto vozu je 55 míst k sezení, a to ve značně stísněném uspořádání sedadel 2+3. Vozidlo je dlouhé přes nárazníky 13,97 m. To odpovídá poměrné hmotnosti cca 1,7 t na metr délky vozidla. Vozidlo je konstruováno jako vozidlo lehké stavby. Naproti tomu dnešní moderní vozidlo normální stavby s klasickými podvozky Regio-Shuttle RS1 (u ČD motorové vozy 840/841) má hmotnost 45 t, obsaditelnost 70 cestujících. Vůz je nízkopodlažní a má délku přes nárazníky 25,5 m. Poměrná hmotnost vozidla na metr délky dosahuje podobných hodnot jako u motorového vozu 810 a to 1,8 t/m délky vozidla. Proto jsem odhadl hmotnost vozidla na 40 tun. Díky danému měrnému výkonu vozidla vychází výkon 400kW na obvodu kola. Maximální zrychlení a zpomalení je omezeno na 1 m/s² po dobu než je tažná síla omezena trakční hyperbolou.[37] [38] [39]

4.2.2) Jízdní odpory a součinitel rotujících hmot

Jízdní odpory a součinitel rotujících hmot jsem zjistil z odborné literatury. Hodnoty jsou následující:

- Součinitel rotujících hmot pro elektrické a motorové jednotky s elektrickým přenosem výkonu $\rho = 0,15 - 0,20 [-] \Rightarrow$ volím 0,15
- Vozidlové odpory pro motorové jednotky, jsou valení kola po kolejnici (a), odpor v ložiskách (b) a odpor prostředí (c).

ρ_l [N/kN]	[-]
<i>a</i>	3
<i>b</i>	0
<i>c</i>	0,00037

[35]

4.2.3) Trakční charakteristika hybridního motorového vozu

Jeden ze základních parametrů hnacích vozidel je graf trakční charakteristiky, který popisuje omezení tažné síly adheze, průběh tažné síly (na kole, nebo na spřáhle) a vozidlových odporů na rychlosti vozidla. Pro naše vozidlo zobrazím do prvního kvadrantu grafu průběh tažné síly na kole, omezení tažné síly adheze a omezení maximálním zrychlením vozidla 1 m/s^2 . Do čtvrtého kvadrantu grafu zobrazím průběh jízdních odporů vozidla. To vše bude závislé na rychlosti vozidla.

Pro výpočet vycházíme z následujících vzorců a parametru vozidla, předem určených. Následné vzorce počítají hodnoty pro určité rychlosti. Výsledný graf získáme spojením bodů, které vzniknou pro určité rychlosti. Rychlosti si volíme libovolně, avšak při volení menších rychlostních kroků získáme přesnější výsledky.

Tažná síla na obvodu kola:

$$F_o = \frac{P_o \cdot 3,6}{V} \quad (5)$$

kde:

F_o = tažná síla na obvodu kola [kN]

P_o = výkon na obvodu kol [kW]

V = rychlost vozidla [km/h]

3,6 = převodový vztah mezi m/s a km/h [-]

Výpočet vozidlových odporů:

$$o_v = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad (6)$$

kde:

o_v = poměrný vozidlový odpor [%]

a = odpor valení kola po kolejnici [-]

b = odpor v ložiscích [-]

c = odpor prostředí [-]

Vozidlový odpor získáme vynásobením poměrného vozidlového odporu tíhou vozidla a převodem na stejné jednotky.

$$O_v = \frac{o_v \cdot G_v}{1000} [\text{kN}] \quad (7)$$

kde:

O_v = vozidlový odpor [kN]

G_v = tíha vozidla [kN]

Výpočet omezující adhezni síly:

$$F_a = \mu_a \cdot G_a \cdot \varepsilon \quad (8)$$

kde:

F_a = adhezni tažná síla [kN]

μ_a = součinitel adheze [-]

G_a = adhezni tíha vozidla [kN]

ε = součinitel využití adheze. Vzniká hlavně působením klopných momentů rámu vozidla a rámu podvozků vozidla. Jeho hodnota bývá 0,9 [-].

Součinitel adheze μ_a není konstantní veličina a její hodnota závisí na mnoha činitelích a mění se v širokých mezích. Jeden z největších vlivů je však kvalita stykových ploch mezi kolejnici a kolem vozidla. V praxi se používají k určení součinitele adheze různé experimentální vztahy. Ve své práci jsem využil vztah podle Curtis-Knifflera.

$$\mu_a = \left(\frac{7500}{V+44} + 161 \right) \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

kde:

V = rychlost vozidla [km/h]

Jízda našeho vlaku je zároveň omezena maximální zrychlením (i zpomalením) na spřáhle a to hodnotou 1 m/s^2 . Toto můžeme vyjádřit na sklonu 0 ‰ vzorcem pro sílu na obvodu kola, který vychází s pohybové rovnice vlaku.

$$F_{1\text{m/s}^2} = G_v \cdot \frac{a}{g} \cdot (1 + \rho) + \frac{G_v \cdot o_v}{1000} \text{ [kN]} \quad (10)$$

kde:

$F_{1\text{m/s}^2}$ = maximální tažná síla pro zrychlení 1 m/s^2 [kN]

a = maximální zrychlení [m/s^2]

ρ = součinitel rotujících hmot [-]

g = tíhové zrychlení [m/s^2]

o_v = poměrný vozidlový odpor [‰]

Dále jsou uvedeny výpočty prvního řádku pro rychlost 10 km/h. Při rychlosti 0 km/h vychází díky trakční parabole tažná síla nekonečně mnoho kN.

Jako první si vypočteme součinitel adheze μ_a dle vzorce (9).

$$\mu_a = \left(\frac{7500}{10+44} + 161 \right) \cdot 10^{-3} = 0,3$$

Druhým výpočtem dle vzorce (8) zjistíme adhezi omezující tažnou sílu při rychlosti 10 km/h. Hmotnost vozidla je 40 t a součinitel využití adheze 0,9 a gravitační zrychlení $9,81 \text{ m/s}^2$.

$$F_a = 0,3 \cdot 40 \cdot 9,81 \cdot 0,9 = 105,91 \text{ kN}$$

Pro měrný vozidlový odpor počítaný dle vzorce (6) při rychlosti 10 km/h vychází tato hodnota.

$$o_v = 3 + 0 \cdot 10 + 0,00037 \cdot 10^2 = 3,000014 \text{ ‰}$$

Při vynásobení tíhou vozidla a převedením jednotek dle vzorce (7), dostaneme vozidlový odpor.

$$O_v = \frac{3,000014 \cdot 40 \cdot 9,81}{1000} = 1,19 \text{ kN}$$

Tažnou sílu na obvodě kola při rychlosti 10 km/h vypočítáme dle vzorce (5). Výkon vychází z výkonu trakčních motorů a ten je 400 kW.

$$F_O = \frac{400 \cdot 3,6}{10} = 144 \text{ kN}$$

Výpočet tažné síly na obvodu kola pro rychlost 10 km/h, která zajistí zrychlení vozu konstantním zrychlením 1 m/s^2 vypočteme dle vzorce (10). Součinitel rotujících hmot má hodnotu $\rho = 0,15[-]$.

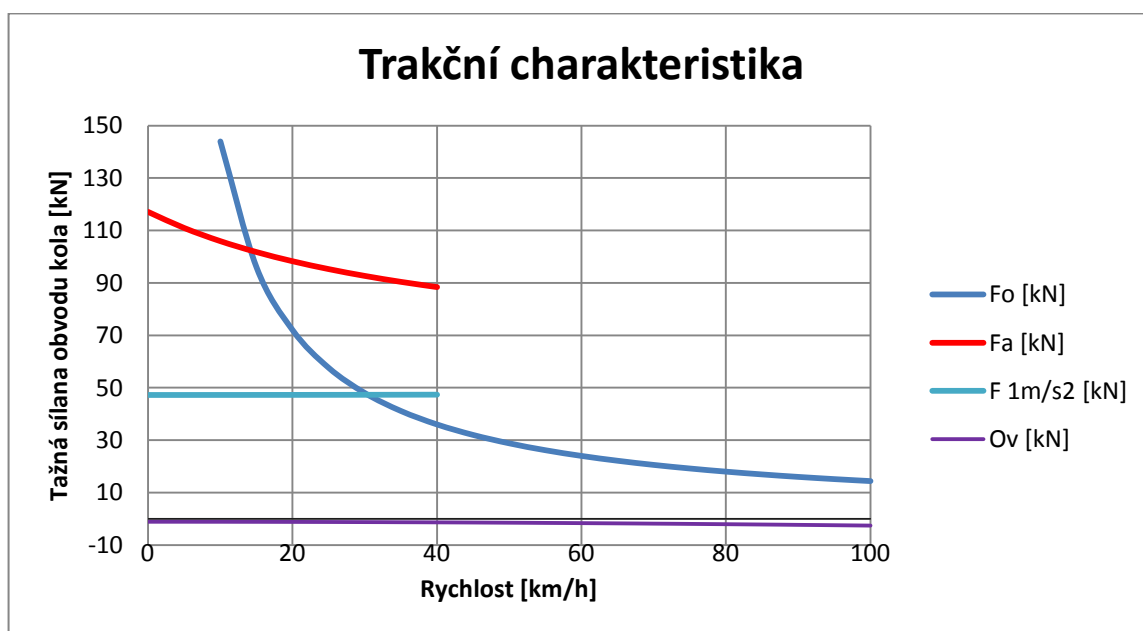
$$F_{1\text{m/s}^2} = 40 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{9,81} \cdot (1 + 0,15) + \frac{40 \cdot 9,81 \cdot 3,000014}{1000} = 47,2 \text{ kN}$$

Pro přehlednost uvádím tabulku hodnot jednotlivých sil, pro určité hodnoty rychlostí vozidla. [35]

V [km/h]	0	10	20	30	40	60	80	100
μ_a	0,33145	0,29988	0,27818	0,26235	0,25028			
Fa [kN]	117,056	105,908	98,2447	92,652	88,3909			
F 1m/s ² [kN]	47,1772	47,1917	47,2352	47,3078	47,4095			
Fo [kN]	∞	144	72	48	36	24	18	14,4
Ov [kN]	1,1772	1,19171	1,23527	1,30786	1,40950	1,69987	2,10640	2,6290

Tabulka 4. Dohádatelná - Excel (redukce sklonu)

Výsledný graf trakční charakteristiky vozidla.



4.3) Výpočet tachogramu

Při výpočtu tachogramu uvažujeme, že hybridní vůz má plynulou regulaci výkonu. Tažná síla hybridního vozu je omezena výkonem adhezí a maximálním dovoleným zrychlením. Tachogram představuje znázornění závislosti jízdy vozidla na nezávislém parametru. Tento parametr může být čas, to je pak rychlost závislá na čase $V=f(T)$, v tomto případě mluvíme o časovém tachogramu, nebo tachogram může být dráhový a rychlost jízdy je závislá na ujeté dráze $V=f(L)$. V této práci využívám dráhový tachogram a výpočetní metodu. Tachogram je počítán v programu Excel a jeho výpočty budou součástí přílohy.

Výpočetní metoda vychází ze základní pohybové rovnice vlaků.

$$F_o = O_v + O_T + O_z \quad (11)$$

kde:

F_o = tažná síla na obvodě kola vypočitatelná ze vzorce (5) [kN]

O_v = vozidlový odpor vypočítaný dle vzorce (6) a (7) [kN]

O_T = odpor tratě [kN]

O_z = odpor zrychlení [kN]

Odpor trati získáme vynásobením vzorce (4) tíhou našeho vozidla a převodem na požadované jednotky.

$$O_T = \frac{o_T \cdot G_v}{1000} \text{ [kN]} \quad (12)$$

kde:

O_T = traťový odpor [kN]

G_v = tíha vozidla [kN]

1000 = převod z N na kN [-]

Odpor zrychlení vypočteme podle tohoto vzorce

$$O_z = G_v \cdot \frac{a}{g} \cdot (1 + \rho) \quad (13)$$

kde:

O_z = odpor zrychlení [kN]

a = maximální zrychlení [m/s^2]

ρ = součinitel rotujících hmot [-]

g = tíhové zrychlení [m/s^2]

Tažná síla a vozidlové odpory jsou závislé na rychlosti, traťový odpor na okamžité poloze vozidla na trati. Při počítání si zjednodušíme výčet předpokladem, že když se změna rychlosti blíží nule, bude tažná síla a vozidlové rychlosti konstantní.

Při počítání tachogramu budu volit pro rozjezd nebo brzdění se zrychlením 1 m/s^2 krok dráhový, kde jeden krok má délku jeden metr. Tímto se vyhnou v případě změny sklonu interpolaci. Rychlost vozidla bude odpovídat ujeté dráze a zrychlení. Při přechodu na trakční hyperbolu, omezenou výkonem pro zrychlení nebo brzdění 400 kW budu volit rychlostní krok po 1 km/h. Ujetou dráhu a zrychlení dopočteme. V případě změny sklonu se interpolaci nevyhneme. [35]

4.3.1) Výpočet pro dráhový krok 1 m a zrychlení 1 m/s^2 .

Jako první si spočítáme rychlost na konci úseku. Vycházíme z vzorce pro rovnoměrné zrychlení.

$$l = \frac{v^2}{2 \cdot a} [\text{m}]$$

Vzorec si upravíme tak abychom zjistili rychlost na konci úseku.

$$V_i = 3,6 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot L \cdot 1000}{a}} \quad (13)$$

kde:

V_i = rychlost vozidla na konci počítaného úseku [km/h]

3,6 = převod rychlosti z m/s na km/h [-]

L = délka úseku od začátku zrychlování [km]

1000 = převod délky z km na m [-]

a = zrychlení vozidla [m/s^2]

výpočet prvního řádku vzorce (13):

$$V_i = 3,6 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,001 \cdot 1000}{1}} = 5,1 \text{ km/h}$$

Střední rychlost v úseku zjistíme sečtením rychlosti na začátku úseku a na konci úseku. Tyto sečtené rychlosti podělíme číslem 2. Střední rychlost v úseku potřebujeme k určení vozidlových odporů a později i k zjištění výkonu na obvodu kola.

$$V_{s_i} = \frac{V_i + V_{i-1}}{2} \quad (14)$$

kde:

V_{s_i} = střední rychlost v počítaném úseku [km/h]

V_{i-1} = rychlost na začátku počítaného úseku [km/h]

V_i = rychlost na konci počítaného úseku [km/h]

Výpočet prvního řádku:

$$V_{s_i} = \frac{0 + 5,1}{2} = 2,55 \text{ km/h}$$

Další potřebný výpočet je určení vozidlových odporů v počítaném úseku. K výpočtu využijeme vzorce (7). Rovnou do něho dosadíme vzorec číslo (6).

$$O_{v_i} = \frac{(a + b \cdot V_{s_i} + c \cdot V_{s_i}^2) \cdot G_v}{1000} \quad (15)$$

$$O_{v_i} = \frac{(3 + 0 \cdot 2,55 + 0,00037 \cdot 2,55^2) \cdot 40 \cdot 9,81}{1000} = 1,2 \text{ kN}$$

Výpočet tažné síly na spřáhle. Zrychlení vozidla působí na osoby ve vozidle, proto počítáme tažnou sílu na spřáhle vozidla. Výpočet tažné síly na spřáhle vychází z pohybové rovnice vlaku (11). Tažná síla na spřáhle je tažná síla na obvodu kola, zmenšena o vozidlové odpory. Proto při výpočtu nebudeme počítat s vozidlovými odpory. Vozidlové odpory následně přičteme k tažné síle na háku. Tímto součtem získáme tažnou sílu na obvodu kola.

Rovnici (11) upravíme pro náš výpočet:

$$F_o = O_v + O_T + O_z \Rightarrow F_o - O_v = O_T + O_z = F_{sp}$$

kde:

F_{sp} = tažná síla na spřáhle [kN]

Do takto upravené rovnice pro F_{sp} dosadíme rovnici (12) do O_T a rovnice (13) do O_z . Výsledkem bude tažná síla na háku pro určité zrychlení.

Upravená rovnice a dosazení do prvního řádku:

$$F_{sp_i} = \frac{o_{T_i} \cdot G_v}{1000} + G_v \cdot \frac{a}{g} \cdot (1 + \rho) \quad (16)$$

$$F_{sp_i} = \frac{-0,8 \cdot 40 \cdot 9,81}{1000} + 40 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{9,81} \cdot (1 + 0,15) = 45,7 \text{ kN}$$

Tažnou sílu na obvodu kola získáme sečtením tažné síly na spřáhle (16) a vozidlových odporů (15).

$$F_{oi} = F_{sp_i} + O_{vi} \quad (17)$$

$$F_{oi} = 45,7 + 1,2 = 46,9 \text{ kN}$$

Výkon na obvodě kola získáme dosazením F_{oi} (17) a V_{si} (14) do upravené rovnice (5).

$$P_{oi} = \frac{F_{oi} \cdot V_{si}}{3,6} \quad (18)$$

$$P_{oi} = \frac{46,9 \cdot 2,55}{3,6} = 33,2 \text{ kW} \quad (\text{při nezaokrouhlování čísel vychází v exelu výsledek } 33,14)$$

Čas vypočteme dle vzorce pro rovnoměrné zrychlení pohyb:

$$t_i = \frac{(V_i - V_{i-1})/3,6}{a} \quad (19)$$

kde:

V_i = rychlost na konci počítaného úseku [km/h]

V_{i-1} = rychlost na konci předcházejícího kroku [km/h]

t_i = čas jízdy v jednom početním krku [s]

3,6 = převod z km/h na m/s [-]

První vypočítaný řádek:

$$t_i = \frac{(5,1-0)/3,6}{1} = 1,42 \text{ s}$$

Celkový čas pro všechny úseky vypočteme dle tohoto vzorce:

$$t_c = \sum t_i \quad (20)$$

kde:

$$t_c = \text{celkový čas [s]}$$

Energii na obvodě kola pro jednotlivé úseky spočítáme dle vzorce:

$$E_{oi} = (P_{oi} \cdot t_i)/3600 \quad (21)$$

kde:

$$E_{oi} = \text{energie na obvodu kola pro jeden úsek [kWh]}$$

$$3600 = \text{převod kW s na kWh}$$

Celková energie pro všechny úseky vypočteme dle tohoto vzorce:

$$E_c = \sum E_{oi} \quad (22)$$

kde:

$$E_c = \text{celková energie [kWh]}$$

Ukázka tabulky pro první výpočtový krok.

L_c [km]	a [m/s ²]	P_{\max} [kW]	F_{sp} [kN]	F_o [kN]	P_o [kW]	O_v [kN]	V_0 [km/h]
0,001	1		45,686	46,864	33,138	1,178	0
ΔV [km/h]	V_1 [km/h]	V_s [km/h]	s [promile]	t [s]	t_c [s]	A [kWh]	
5,091	5,091	2,546	-0,80	1,414	1,414	0,013	

Tabulka 5. Ukázka tabulky výpočtu tachogramu - Excel (Tachogramy, výp. spotřeb)

4.3.2) Výpočet pro rychlostní krok

Při nedostatku výkonu na obvodě kola není vozidlo schopno udržet zrychlení 1 m/s^2 . Toto řešíme tím, že si zvolíme libovolný rychlostní krok. U rychlostního kroku vypočteme střední hodnotu rychlosti. Tu dosadíme do pohybové rovnice vlaku. Tažnou sílu na obvodu kola spočítáme z výkonu na obvodu kola, který je roven 400kW. Z pohybové rovnice vlaku si vytkneme zrychlení. Zrychlení následně vypočítáme. Díky známé rychlosti, ujeté

dráze na počátku výpočtového kroku a zrychlení ve výpočtovém kroku dopočtem ujetou celkovou vzdálenost na konci výpočetního kroku. Ostatní vzorce se oproti dráhovému kroku nemění.

Střední rychlost ve výpočtovém kroku spočítáme dle vzorce (14).

$$V_{s_i} = \frac{V_i + V_{i-1}}{2} \quad (14)$$

kde:

V_{s_i} = střední rychlost v počítaném úseku [km/h]

V_{i-1} = rychlost na začátku počítaného úseku [km/h]

V_i = rychlost na konci počítaného úseku (volíme si) [km/h]

Výpočet prvního řádku:

$$V_{s_i} = \frac{31 + 30,55}{2} = 30,78 \text{ km/h}$$

Jako další krok upravíme základní pohybovou rovnici vlaku (11) tak, abychom získaly zrychlení vozu:

$$F_o = O_v + O_T + O_z$$

$$\frac{P_o \cdot 3,6}{V_{s_i}} = \frac{(a + b \cdot V_{s_i} + c \cdot V_{s_i}^2) \cdot G_v}{1000} + \frac{o_{T_i} \cdot G_v}{1000} + G_v \cdot \frac{a_i}{g} \cdot (1 + \rho) \Rightarrow$$

$$a_i = \left(\frac{P_o \cdot 3,6}{V_{s_i}} - \frac{(a + b \cdot V_{s_i} + c \cdot V_{s_i}^2) \cdot G_v}{1000} - \frac{o_{T_i} \cdot G_v}{1000} \right) \cdot \frac{g}{(1 + \rho) \cdot G_v} \quad (23)$$

Výpočet prvního řádku:

$$a_i = \left(\frac{400 \cdot 3,6}{30,78} - \frac{(3 + 0 \cdot 30,78 + 0,00037 \cdot 30,78^2) \cdot 40 \cdot 9,81}{1000} - \frac{-0,8 \cdot 40 \cdot 9,81}{1000} \right) \cdot \frac{9,81}{(1 + 0,15) \cdot 40 \cdot 9,81}$$

$$a_i = 0,995494 \text{ m/s}^2$$

Celkovou ujetou vzdálenost zjistíme přičtením ujeté vzdálenosti ve výpočtovém kroku k předchozí celkové ujeté vzdálenosti.

$$L_{c_i} = L_{c_{i-1}} + \frac{V_{i-1}}{3,6} + \frac{1}{2} \cdot \frac{a_i \cdot t_i^2}{1000} \quad (24)$$

kde:

L_{c_i} = celková ujetá dráha na konci výpočtového kroku [km]

$L_{c_{i-1}}$ = celková ujetá dráha na konci předchozího výpočtového kroku [km]

1000 = přepočet dráhy z m na km [-]

Výpočet prvního řádku:

$$L_{c_i} = 0,036 + \frac{30,547}{3,6} + \frac{1}{2} \cdot \frac{0,995 \cdot 0,126^2}{1000} = 0,0371 \text{ km}$$

Ostatní vzorce jsou stejné jak pro výpočet dle dráhového kroku tak i pro výpočet dle rychlostního kroku.

Ukázka tabulky pro rychlostní výpočtový krok.

L_c [km]	A [m/s ²]	P max [kW]	Fsp [kN]	F o [kN]	Po [kW]	OV [kN]	V0 [km/h]
0,0371	0,995	400	45,479	46,793	400	1,315	30,54701
delta V [km/h]	V1 [km/h]	Vs [km/h]	s [promile]	T [s]	Tc [s]	A [kWh]	
0,453	31,000	30,774	-0,80	0,126	8,612	0,014	

Tabulka 6. Ukázka tabulky výpočtu tachogramu - Excel (Tachogramy, výp. spotřeb)

4.3.3) Výpočet interpolace při rychlostním kroku

Když se mění hodnota redukovaného sklonu trati, musíme provést interpolaci.

Interpolace se vypočte podle vzorce:

$$\Delta V_i = \Delta V_x \cdot \frac{\Delta L_i}{\Delta L_x} \quad (25)$$

kde:

ΔV_i = rozdíl rychlostí nového kroku [km/h]

ΔV_x = rozdíl rychlostí kroku, u kterého ujetá dráha překračovala změnu sklonu [km/h]

ΔL_i = dráha kroku do změny sklonu [km]

ΔL_x = délka původního úseku, který překračoval změnu sklonu [km]

Výpočet první interpolace

$$\Delta V_i = 1 \cdot \frac{0,042-0,039581}{0,042246-0,03958} = 0,908 \text{ km/h}$$

Ukázka tabulky, kde proběhla interpolace:

L _c Změna s.	L _c [km]	a [m/s ²]]	F _{sp} [kN]	F _o [kN]	OV [kN]	V ₀ [km/h]	delta V	V ₁ [km/h]	V _s [km/h]	s [promile]
	0,039581	0,971	44,39	45,71	1,321263	31	1	32	31,5	-0,8
0,042	0,042246	0,941	42,97	44,30	1,330555	32	1	33	32,5	-0,8
	0,042	0,942	43,04	44,37	1,33012	32	0,907688	32,90769	32,45384	-0,8
	0,042265	0,887	42,36	43,69	1,3348	32,90769	0,092312	33	32,95384	3,97

Tabulka 7. Ukázka tabulky výpočtu interpolace - Excel (Tachogramy, výp. spotřeb)

Čas výpočtu dle vzorce (19), proto se nemusí interpolovat čas. [35]

4.3.4) Výpočet pro jízdu konstantní rychlosti

Pro jízdu konstantní rychlosti platí ty samé vzorce jak pro zrychlování. Jediný vzorec, který se musí upravit je vzorec pro určení času, jelikož je zrychlení / zpomalení rovno nule.

$$t_i = \frac{\Delta L_i \cdot 1000}{V \cdot 3,6} \text{ [s]} \quad (26)$$

Převod z vteřin na minuty:

$$T_i = \frac{t_i}{60} \text{ [min]} \quad (27)$$

kde:

t_i = čas početního kroku [s]

ΔL_i = dráha příslušící jednomu výpočtovému kroku. [km]

V = konstantní rychlost [km/h]

T_i = čas upravený na minuty [min]

4.3.5) výpočet při zpomalování

Při brzdění se postupuje úplně stejně jako při zrychlování. Jediné co se musí udělat je změnit u požadovaného zrychlení a maximálního brzdného výkonu znaménko tak, aby

byly hodnoty záporné. Dále se musí upravit vzorce (13) a (19) tak, aby zrychlení mělo kladnou hodnotu.

4.4) Výsledné tachogramy


Z výpočtu pro konstrukci tachogramu získáme hodnoty veličin, které se nachází na obvodu kola. Tyto veličiny jsou:


- Rychlost
- Čas
- Síla
- Dráha


Díky výpočtům získáme:


- Výkon
- Energii


V tachogramech jsou znázorněny jednotlivé režimy jízdy a to barvou čáry.

 Režim maximálního zrychlení 1 m/s^2 po dosažení výkonu na obvodě kola $P_o = 400 \text{ kW}$, je zrychlení omezeno trakční hyperbolou.

 Režim jízdy ustálenou rychlostí, avšak výkon na obvodě kola je větší jak 0 W . Trakční motor spotřebovává energii.

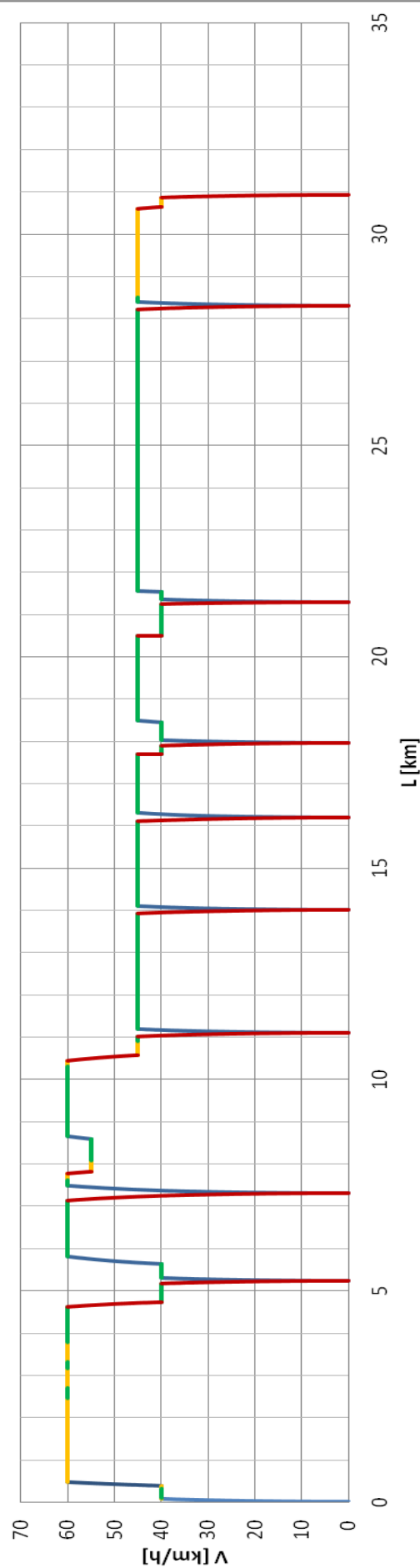
 Režim maximálního zpomalení omezený výkonem $P_o = 400 \text{ kW}$ a maximálním brzdým zpomalením 1 m/s^2 .

 Čas stání ve stanici, nebo zastávce.

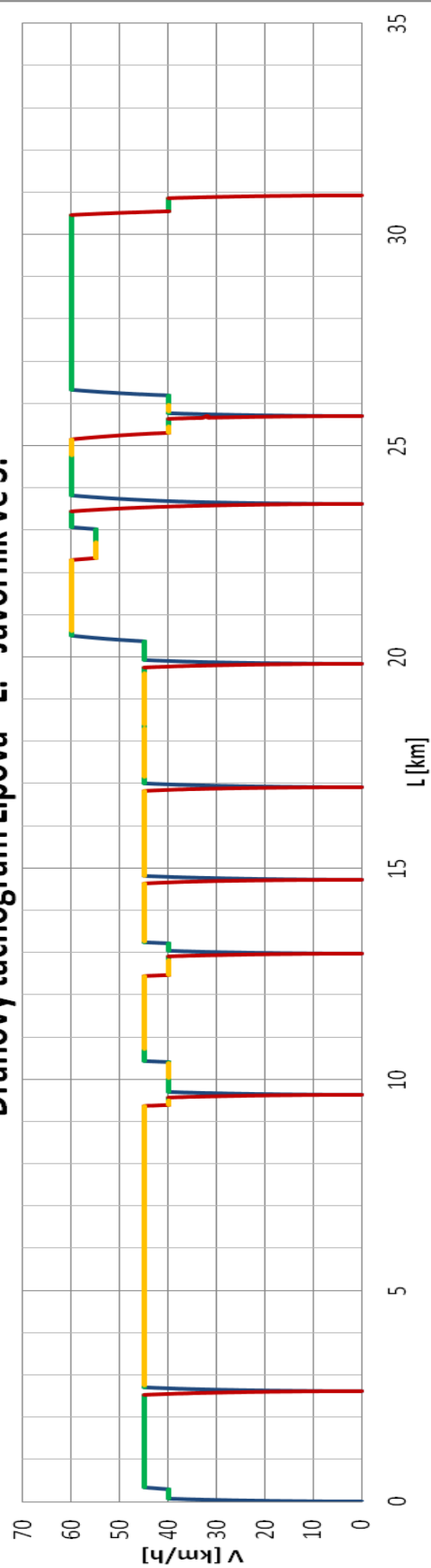
 Režim jízdy ustálenou rychlostí, avšak výkon na obvodě kola je záporný. Trakční motor funguje jako generátor.

Jízda byla optimalizována tak, aby byly dosaženy nejkratší jízdní doby a byla dodržována nejvyšší traťová rychlost. Proto se v tachogramu neobjevuje jízda výběhem. Tachogram byl počítán kompletně numericky v programu Excel.

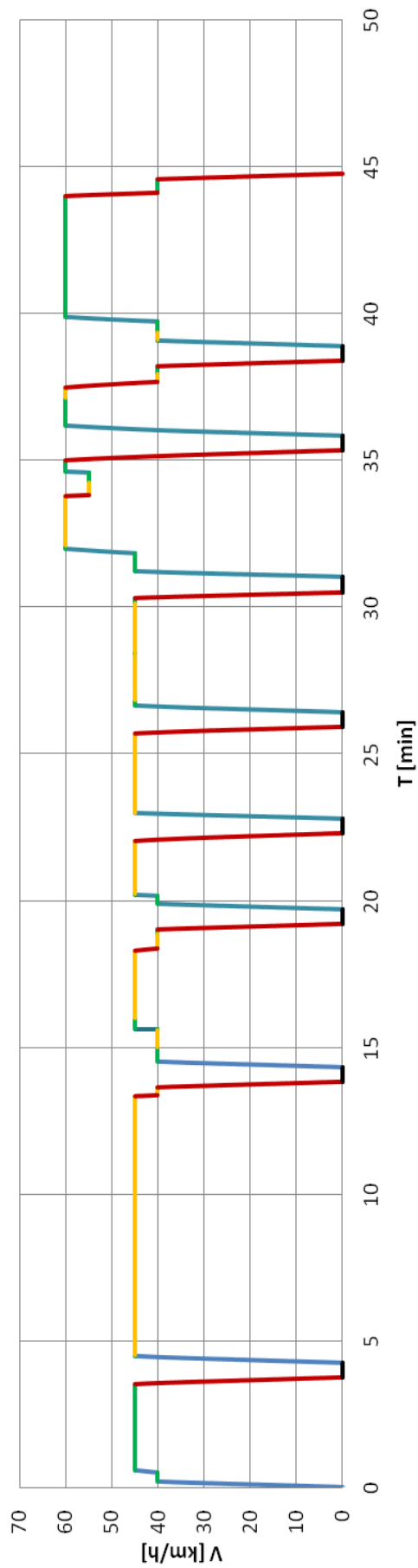
Dráhový tachogram Javorník ve S. - Lipová L.



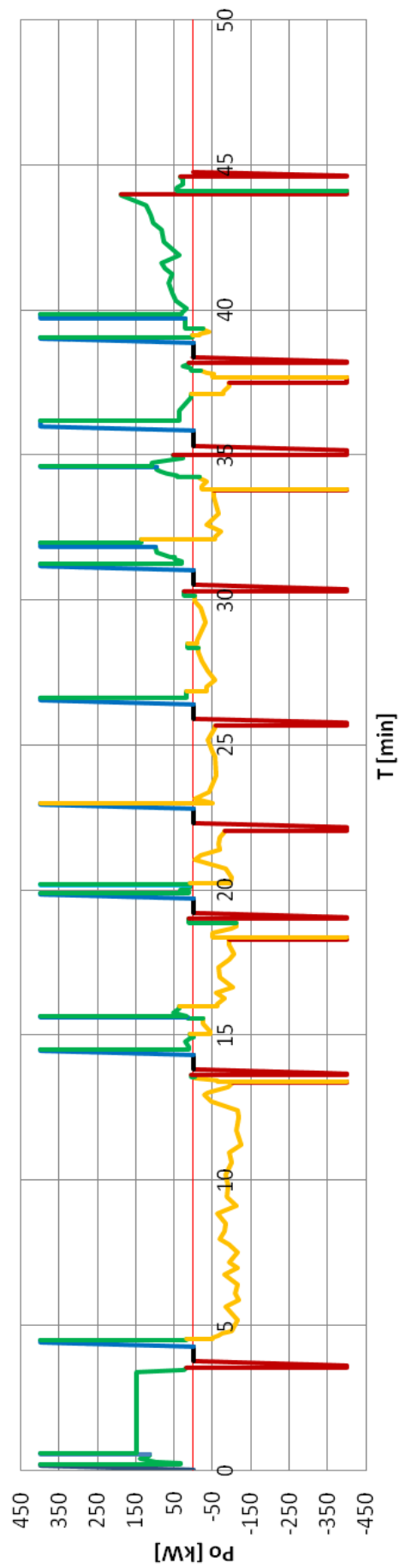
Dráhový tachogram Lipová - L. - Javorník ve S.



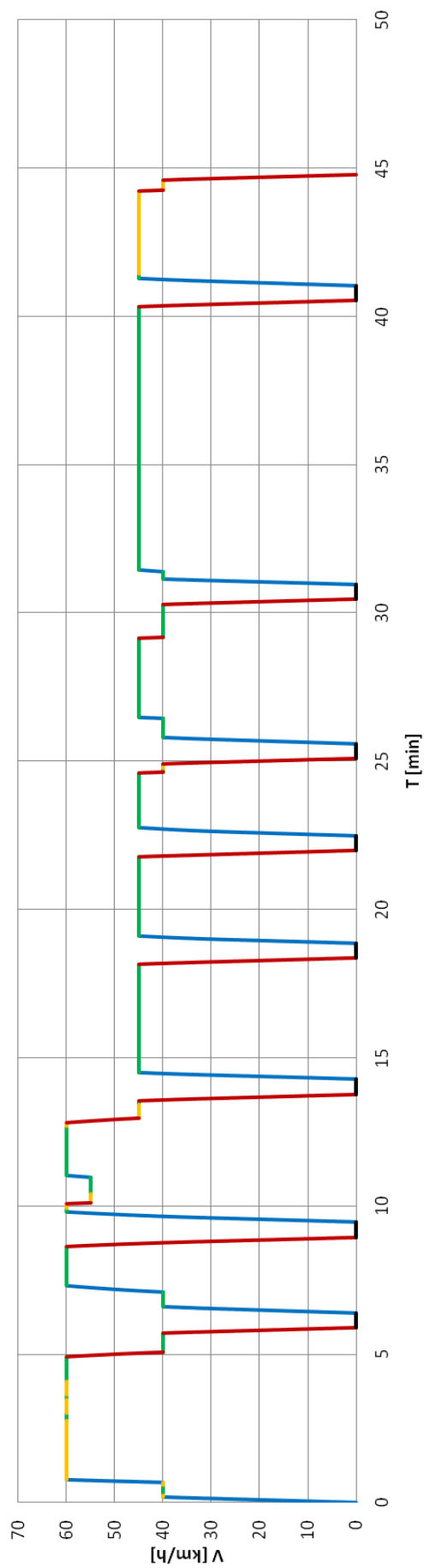
Časový tachogram Lipová L. - Javorník ve S.



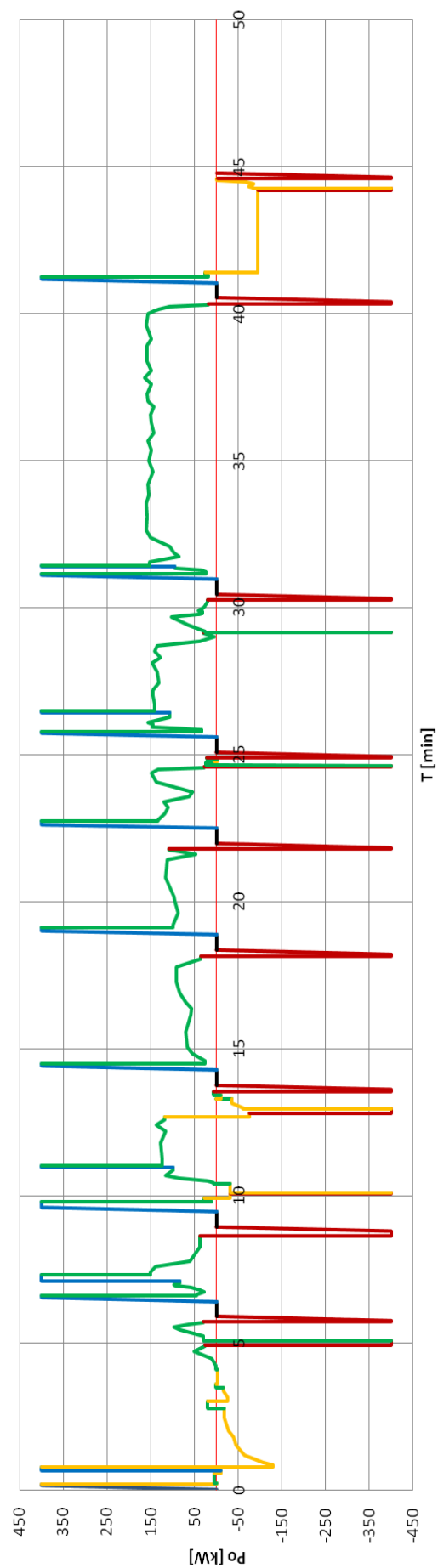
Výkon na obvodě kol



Časový tachogram Javorník ve S. - Lipová L.



Výkon na obvodě kol

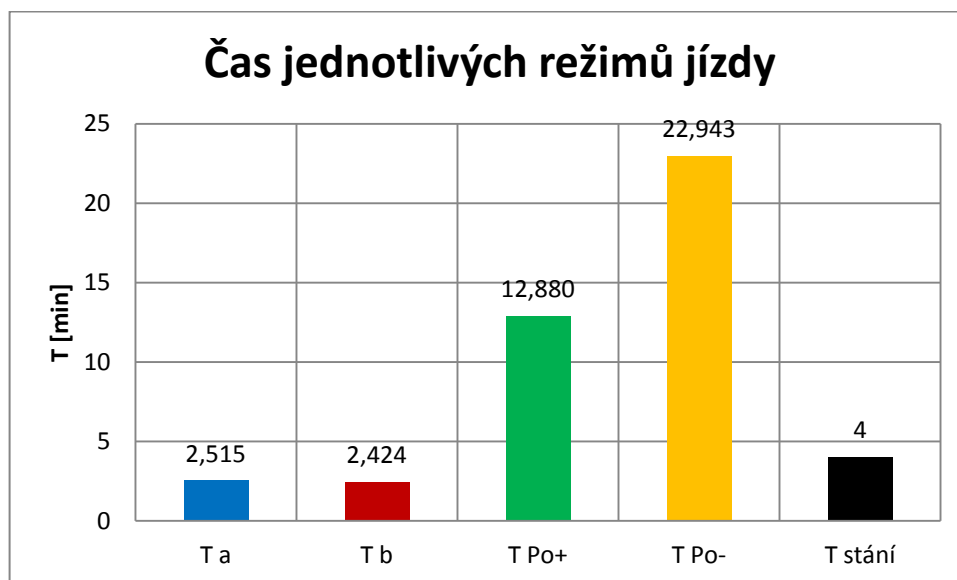


4.4.1) Rozbor jízdy vozidla vyšlý z tachogramu pro směr do Javorníku ve S.

Jedná se o směr, na kterém převyšují spády, a z energetického hlediska se jedná o méně náročný směr. Z grafů jdou vidět následující údaje:

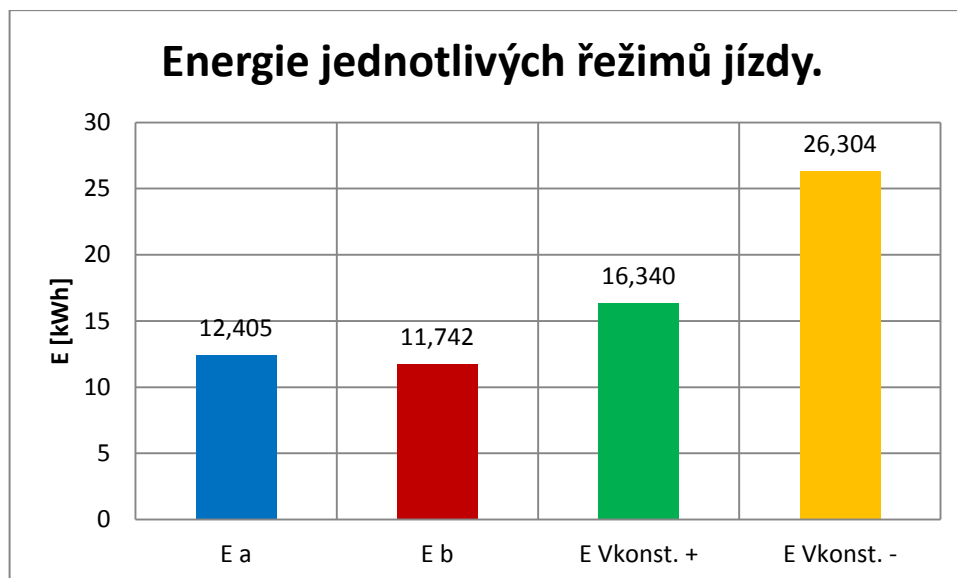
- celková jízdní doba bez zastávek – 40,76 minuty, se zastávkami 44,76 minuty.
- maximální výkon na obvodu kola pro jízdu stálou rychlostí – 186,9 kW
- maximální brzdný výkon na obvodě kola pro jízdu stálou rychlostí – 123,9 kW
- energie dodaná pro jízdu na obvodě kola – 28,8 kWh
- energie pro brzdění na obvodě kola – 38,1 kWh
- nejdelší rozjezd z nulové rychlosti na rychlost 60 km/h trval - 21,2 vteřiny

Porovnání provozních režimů dle času:



Obr. 17 Graf času jednotlivých režimů jízdy. (Ta – požadavek maximálního zrychlení; Tb požadavek maximálního zpomalení; T Po+ požadavek na udržení konstantní rychlosti a kladný tah; T Po- požadavek na udržení konstantní rychlosti a záporný tah; T stání- doba stání v zastávce)

Porovnání spotřebované, nebo vydané energie na obvodu kol dle režimu jízdy:



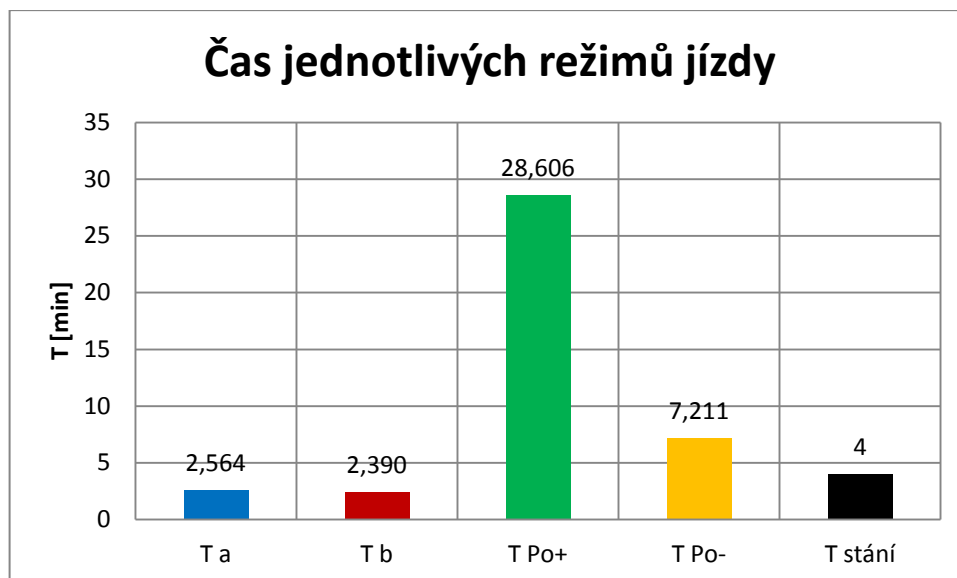
Obr. 18. Graf energie jednotlivých režimů jízdy. (Ea – požadavek maximálního zrychlení; Eb požadavek maximálního zpomalení; E V konst.+ požadavek na udržení konstantní rychlosti a kladný tah; E V konst.- požadavek na udržení konst. rychlosti a záporný tah)

4.4.2) Rozbor jízdy vozidla vyšlý z tachogramu pro směr do Lipové - L.

Jedná se o směr, který je energeticky náročnější. jelikož podstatná část tratě vede do stoupání.

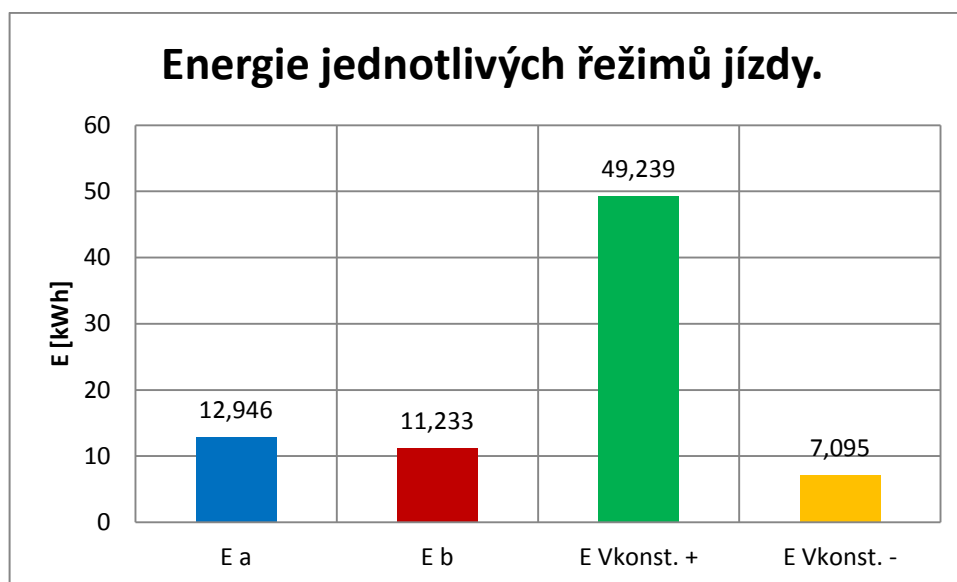
- celková jízdní doba bez zastávek – 40,77 minuty, se zastávkami 44,77 minuty
- maximální výkon na obvodu kola pro jízdu stálou rychlostí – 164,4 kW
- maximální brzdný výkon na obvodě kola pro jízdu stálou rychlostí – 129,8 kW
- energie dodaná pro jízdu na obvodě kola – 62,2 kWh
- energie pro brzdění na obvodě kola – 18,3 kWh
- nejdelší rozjezd z nulové rychlosti na rychlost 60 km/h trval – 20,5 vteřiny

Porovnání provozních režimů dle času:



Obr. 19 Graf času jednotlivých režimů jízdy. (Ta – požadavek maximálního zrychlení; Tb požadavek maximálního zpomalení; T Po+ požadavek na udržení konstantní rychlosti a kladný tah; T Po- požadavek na udržení konstantní rychlosti a záporný tah; T stání- doba stání v zastávce)

Porovnání spotřebované, nebo vydané energie na obvodu kol dle režimu jízdy:



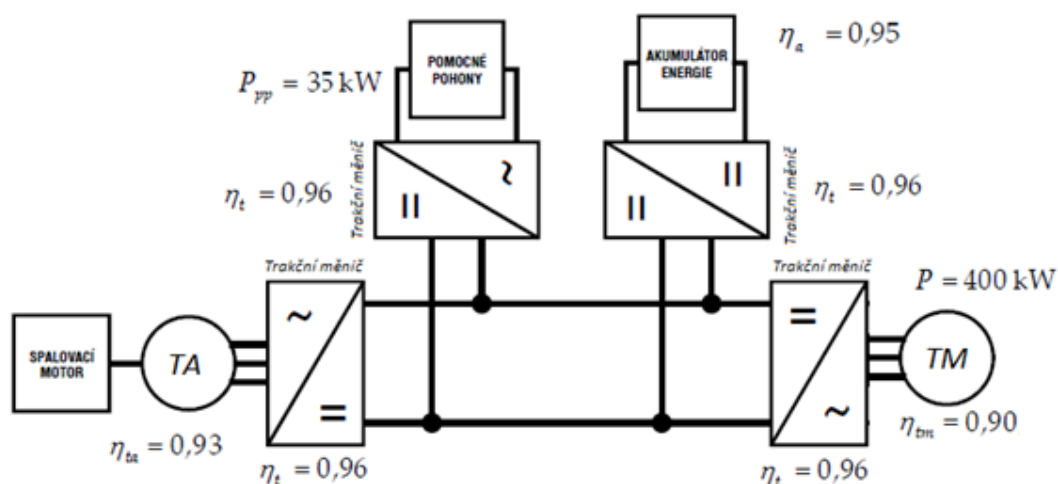
Obr. 20 Graf energie jednotlivých režimů jízdy. (Ea – požadavek maximálního zrychlení; Eb požadavek maximálního zpomalení; E V konst.+ požadavek na udržení konstantní rychlosti a kladný tah; E V konst.- požadavek na udržení konst. rychlosti a záporný tah)

5) Návrh využití hybridního pohonu

5.1) Skladba trakčního obvodu a účinnosti jednotlivých prvků.

Trakční obvod zajišťuje přenos výkonu jak ze spalovacího motoru, tak u hybridního vozidla i přenos výkonu z akumulátoru. U svého hybridního vozidla volím kombinaci elektrochemických akumulátorů z důvodů velké energetické kapacity, a superkapacitorů z důvodu poskytovaných velkých krátkodobých výkonů. Účinnosti těchto zařízení jsem popsal v kapitole, která se věnovala akumulátorům. Jelikož nebudeme hodnotit, zda se energie ukládá do akumulátoru, nebo do superkapacitoru zvolím pro akumulátory i superkapacitory stejnou účinnost a to 95% a budu je považovat za jeden akumulátor. Dalším důležitým prvkem v trakčním obvodu jsou trakční měniče. Dneska se používají nejčastěji čtyřkvadrantové měniče, které mohou měnit jak stejnosměrné, nebo střídavé napětí, usměrňovat střídavé napětí anebo naopak vytvářet ze stejnosměrného napětí střídavé. Tyto regulační prvky se skládají v dnešní době z IGBT tranzistorů. Jejich účinnost bývá vysoká a pohybuje se mezi 95 – 98 %. Pro své výpočty volím účinnost 96 %. Dnešní moderní vozidla používají jako generátory, nebo motory, 3 fázové střídavé elektrické fázové točivé stroje. Oproti stejnosměrným strojům tyto stroje postrádají komutátor, což je zařízení, které potřebuje údržbu (uhlíky) a dochází na něm při špatném izolačním stavu k přeskoku elektrického oblouku (nejčastější porucha). U alternátoru budu počítat s účinností 93 % a u trakčního motoru při započítání ozubeného převodu a ložisek s účinností 90 %. U trakčního motoru nemůžeme zapomenout, že v režimu elektrodynamické brzdy nebrzdí až do úplného konce, ale je při nízkých rychlostech nahrazen doplňkovou brzdou. Ve výpočtech počítám s hraniční rychlostí $V = 5,1 \text{ km/h}$. Střední hodnotu příkonu pomocných pohonů volím dle odborného odhadu a dostupných zdrojů 35kW. Do spotřeby pomocných pohonů jsem započítal i vlastní spotřebu vozu. [40] [41]

Pro lepší názornost zobrazení účinnosti na obrázku:



Obr. 21 Trakční obvod hybridního vozu [2] [40]

5.2) Výpočet spotřeby vozu bez hybridního pohonu.

Před zahájením výpočtu budeme uvažovat, že motor po celou dobu jízdy napájí pomocné pohony a vlastní spotřebu, která činí 35 kW. Příkon spotřeby pomocných pohonů a napájení vlastní spotřeby zjistíme vydělením výkonu příslušnou účinností, která se nachází na cestě spalovací motor – pomocné pohony. Spotřebu pro trakční účely jsme získaly při výpočtu tachogramu. Tuto spotřebu získáme vydělením trakční spotřeby na obvodu kola účinností, která se nachází mezi spalovacím motorem a trakčním motorem.

Účinnosti pro jízdu konvenčního motorového vozu spočteme dle obrázku č. 19

Celkovou účinnost pro trakci zjistíme vynásobením jednotlivých účinností mezi spalovacím motorem a trakčním motorem.

$$\eta_{tr} = \eta_{alt} \cdot \eta_{tmě}^2 \cdot \eta_{tm} \quad (28)$$

$$\eta_{tr} = 0,93 \cdot 0,96^2 \cdot 0,90 = 0,77 [-]$$

Celkovou účinnost pro napájení vlastní spotřeby a pomocných pohonů zjistíme vynásobením jednotlivých účinností mezi spalovacím motorem blokem pomocných pohonů.

$$\eta_{pp} = \eta_{alt} \cdot \eta_{tmě}^2 \quad (29)$$

$$\eta_{pp} = 0,93 \cdot 0,96^2 = 0,86 [-]$$

Spotřeba pomocných pohonů bude pro všechny režimy jízdy stejná, proto ji můžeme vypočítat podle vzorce (30). Tím získáme příkon ze spalovacího motoru.

$$P_{ppsm} = \frac{P_{pp}}{\eta_{pp}} \quad (30)$$

kde:

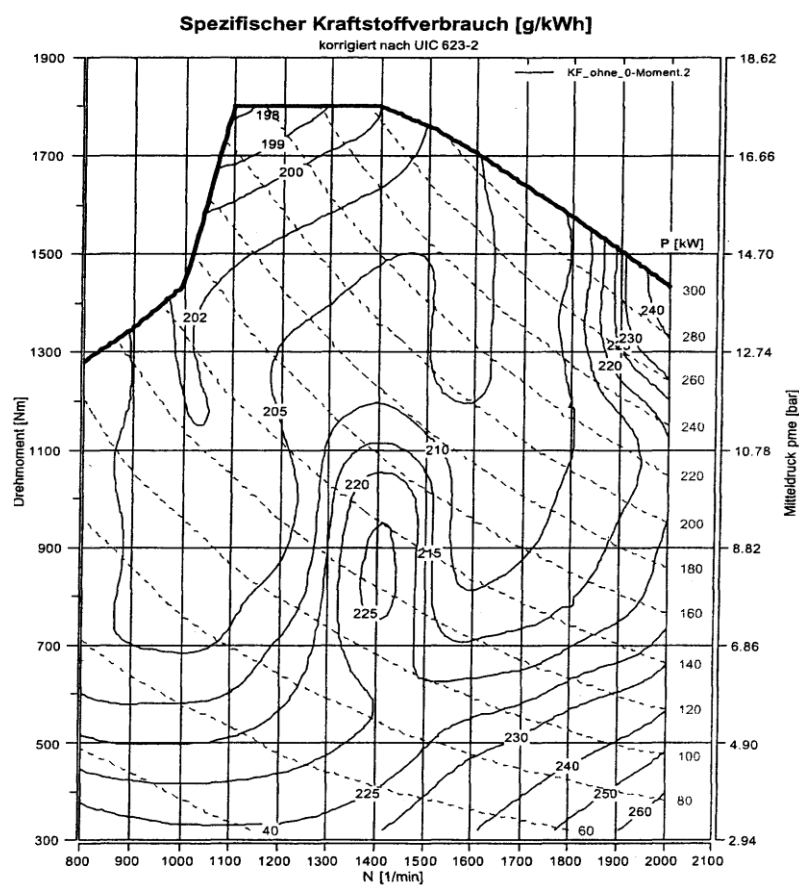
P_{ppsm} = výkon SM pro pomocné pohony a vlastní spotřebu (35kW) [kW]

η_{pp} = účinnost mezi SM a pomocnými pohony, a vlastní spotřebou [-]

Po dosazení do vzorce (30) vychází výkon SM pro pomocné pohony a vlastní spotřebu:

$$P_{ppsm} = \frac{35}{0,86} = 40,8 \text{ kW.}$$

Důležitý údaj je měrná spotřeba spalovacího motoru. Tu odečteme z úplné rychlostní charakteristiky motoru. Tuto charakteristiku se mi podařilo získat pro motor MAN o výkonu 300 kW, viz následující obrázek.



Obr. 22 Úplná rychlostní charakteristiku motoru.[42]

Při úvaze, že náš vůz má elektrický přenos výkonu a neznáme výkonovou a otáčkovou charakteristiku alternátoru. Budeme uvažovat, že díky buzení jsou potřebné otáčky alternátoru vyladěny s otáčkami spalovacího motoru tak, aby v celém spektru otáček se měrná spotřeba pohybovala co v nejlepších hodnotách. Proto budu v prvních dvou fázích počítat s hodnotou 210 g/kWh. Při jízdě výběhem, kdy jsou napájeny jen pomocné pohony a vlastní spotřeba při odpovídajícím výkonu 40,8 kW bude počítáno s měrnou spotřebou 220 g/kWh, která odpovídá cca 925 ot/min.

U klasického motorového vozu pro náš výpočet budeme uvažovat tři režimy jízdy oproti pěti režimům jízdy hybridního vozidla:

- 1) Jízda s dosahujícím maximálním zrychlením a tím pádem jízda dosahuje maximálního výkonu na trakčních motorech.
- 2) Jízda výkonem pro udržení požadované rychlosti (kladný tah).
- 3) Jízda výběhem, nebo stání, kdy jsou napájeny pomocné pohony a vlastní spotřeba.

Při jízdě výběhem budeme uvažovat, že se jedná o moderní vozidlo, kde vlastní spotřebu a napájení pomocných pohonů bude zajišťovat jeden motor. Výcházím z dnešních automobilů, kde je téměř v základní výbavě poskytován start-stop systém spalovacího motoru. Dnes již existuje i v Evropě lokomotiva, která kombinuje čtyři diesellové motory a zapíná jednotlivé motory podle požadavku na výkon. Jedná se o lokomotivu TRAXX DE Multi engine, kterou si objednaly u společnosti Bombardier německé dráhy.

Nesmíme zapomenout, že výkon na kole dosahuje 400 kW. Proto musíme ověřit, zda výkon 2 x 300 kW bude dostatečný. Ten ověříme dle vzorce (31)

$$P_{SM_{max}} = P_{pp_{sm}} + \frac{P_{tr_{max}}}{\eta_{tr}} \quad (31)$$

$$P_{SM_{max}} = 40,8 + \frac{400}{0,77} = 559,4 \text{ kW}$$

Při výsledku 559,4 kW je vhodné mít výkon 600 kW na spalovacích motorech, z hlediska napájení pomocných pohonů, jelikož se jedná o průměrný výkon při napájení pomocných pohonů a vlastní spotřeby. V reálném provozu se mohou vyskytnout špičky v napájení. [42]

5.2.1) Výpočet spotřeby pro jízdu ve směru Javorník ve S.

a) Výpočet spotřeby pro první fázi, to znamená požadavek maximálního zrychlení.

Z grafů na obr. 17 a obr. 18 vidíme, že vozidlo v tomto směru spotřebuje pro rozjezd a trakci 12,405 kWh a setrvává v tomto stavu 2,515 minuty, kdy jsou také napájeny pomocné pohony a vlastní spotřeba.

Jako první spočteme celkovou energii, kterou musí poskytnout spalovací motor pro rozjezdy vozidla.

$$E = \frac{E_T}{\eta_{tr}} + P_{p_{sm}} \cdot \frac{T}{60} \quad (32)$$

kde:

E = celková energie [kWh]

E_T = energie určená pro trakci [kW]

η_{tr} = účinnost trakce [-]

T = čas [min]

60 = převod času z minut na hodiny [-]

Celková energie po dosažení čísel z grafů na obr. 17 a obr. 18 do vzorce (32):

$$E_1 = \frac{12,405}{0,77} + 40,8 \cdot \frac{2,515}{60} = 17,8 \text{ kWh}$$

Výsledná spotřeba paliva se při uvažované měrné spotřebě 210 g/kWh dle vzorce:

$$M_{PH} = \frac{m_{pe} \cdot E}{1000} \quad (33)$$

kde:

M_{PH} = spotřeba paliva [kg]

m_{pe} = měrná spotřeba paliva [g/kWh]

E = energie [kWh]

1000 = převod hmotnosti z g na kg [-]

Spotřebované palivo pro jízdu prvního režimu po dosažení čísel do vzorce (33) vychází:

$$M_{PH_1} = \frac{210 \cdot 17,8}{1000} = 3,74 \text{ kg}$$

b) Výpočet spotřeby pro druhou fázi, to znamená požadavek na výkon pro udržení konstantní rychlosti.

Z grafů na obr. 17 a obr. 18 vidíme, že vozidlo v tomto směru spotřebuje jízdou konstantní rychlostí 16,340 kWh pro trakci a setrvává v tomto stavu 12,880 minuty, kdy jsou také napájeny pomocné pohony a vlastní spotřeba.

Celková energie po dosažení čísel z grafu na obr. 17 a obr. 18 do vzorce (32):

$$E_2 = \frac{16,340}{0,77} + 40,8 \cdot \frac{12,880}{60} = 29,95 \text{ kWh}$$

Spotřebované palivo pro jízdu v druhém režimu po dosažení čísel do (33) vzorce vychází:

$$M_{PH_2} = \frac{210 \cdot 29,95}{1000} = 6,29 \text{ kg}$$

c) Výpočet spotřeby pro třetí fázi, to znamená jízda výběhem a stání ve stanici.

Z grafu na obr. 17 vidíme, že vozidlo v tomto směru setrvává v klidu, nebo je v jízdě výběhem případně brzdí do zastávky, po dobu 22,943 + 4 + 2,424 minuty, kdy jsou napájeny jen pomocné pohony a vlastní spotřeba.

Celková energie po dosažení čísel z grafu na obr. 17 do vzorce (32):

$$E_3 = \frac{0}{0,77} + 40,8 \cdot \frac{29,367}{60} = 19,97 \text{ kWh}$$

Spotřebované palivo pro třetí režim provozu po dosažení čísel do (33) vzorce vychází:

$$M_{PH_3} = \frac{220 \cdot 19,97}{1000} = 4,39 \text{ kg}$$

Celková spotřeba je rovna součtu jednotlivých spotřeb:

$$M_{PH_C} = \sum M_{PH_i} \tag{34}$$

$$M_{PH_C} = 3,74 + 6,29 + 4,39 = 14,42 \text{ kg}$$

Při přepočtu hmotnosti na objem vycházím z hustoty $\rho = 0,870 \text{ kg/dm}^3$. [43]

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{14,42}{0,87} = 16,6 \text{ dm}^3 \text{ potažmo litrů nafty}$$

Spotřebu na 100km vyjádříme pomocí trojčlenky. Naše trať je dlouhá 30,92km.

$$M_{PH_{100}} = \frac{16,6}{30,92} \cdot 100 = 53,6 \text{ l/100km}$$

5.2.2) Výpočet spotřeby pro jízdu ve směru Lipová L.

a) Výpočet spotřeby pro první fázi, to znamená požadavek maximálního zrychlení.

Z grafů na obr 19 a obr. 20 vidíme, že vozidlo v tomto směru spotřebuje pro rozjezd a trakci 12,946 kWh a setrvává v tomto stavu 2,564 minuty, kdy jsou také napájeny pomocné pohony a vlastní spotřeba.

Celková energie po dosažení čísel z grafu na obr 19 a obr. 20 do vzorce (32):

$$E_1 = \frac{12,946}{0,77} + 40,8 \cdot \frac{2,564}{60} = 18,52 \text{ kWh}$$

Spotřebované palivo pro jízdu prvního režimu po dosažení čísel do vzorce (33) vychází:

$$M_{PH_1} = \frac{210 \cdot 18,52}{1000} = 3,89 \text{ kg}$$

b) Výpočet spotřeby pro druhou fázi, to znamená požadavek na výkon pro udržení konstantní rychlosti.

Z grafů na obr 19 a obr. 20 vidíme, že vozidlo v tomto směru spotřebuje jízdou konstantní rychlostí 49,239 kWh pro trakci a setrvává v tomto stavu 28,606 minuty, kdy jsou také napájeny pomocné pohony a vlastní spotřeba.

Celková energie po dosažení čísel z grafů na obr 18 a obr. 19 do vzorce (32):

$$E_2 = \frac{49,239}{0,77} + 40,8 \cdot \frac{28,606}{60} = 83,30 \text{ kWh}$$

Spotřebované palivo pro jízdu v druhém režimu po dosažení čísel do (33) vzorce vychází:

$$M_{PH_2} = \frac{210 \cdot 83,30}{1000} = 17,5 \text{ kg}$$

c) Výpočet spotřeby pro třetí fázi, to znamená jízda výběhem a stání ve stanici.

Z grafu na obr. 19 vidíme, že vozidlo v tomto směru setrvává v klidu, nebo je v jízdě výběhem případně brzdí do zastávky, po dobu 7,211 + 4 + 2,390 minuty, kdy jsou napájeny jen pomocné pohony a vlastní spotřeba.

Celková energie po dosazení čísel z grafu na obr. 19 do vzorce (32):

$$E_3 = \frac{0}{0,77} + 40,8 \cdot \frac{13,601}{60} = 9,25 \text{ kWh}$$

Spotřebované palivo pro třetí režim provozu po dosažení čísel do (33) vzorce vychází:

$$M_{PH_3} = \frac{220 \cdot 9,25}{1000} = 2,03 \text{ kg}$$

Celková spotřeba je rovna součtu jednotlivých spotřeb:

$$M_{PH_C} = \sum M_{PH_i} \quad (34)$$

$$M_{PH_C} = 3,89 + 17,49 + 2,03 = 23,41 \text{ kg}$$

Při přepočtu hmotnosti na objem vycházím z hustoty $\rho = 0,870 \text{ kg/dm}^3$. [43]

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{23,41}{0,87} = 26,9 \text{ dm}^3 \text{ potažmo litrů nafty}$$

Spotřebu na 100km vyjádříme pomocí trojčlenky. Naše trať je dlouhá 30,92km.

$$M_{PH_{100}} = \frac{26,9}{30,92} \cdot 100 = 87 \text{ l/100km}$$

5.3) Výpočet spotřeby vozu s hybridním pohonem.

Při výpočtu spotřeby paliva budeme vycházet z předpokladu, že motor je využíván v pracovním bodě, kde dosahuje nejmenších měrných spotřeb. Budu uvažovat měrnou spotřebu 210 g/kWh pro všechny fáze jízdy a stání.

Z hlediska účinností může jít rekuperovaná energie třemi cestami, které vedou přes jednotlivé prvky trakčního obvodu s dílčími účinnostmi odpovídající obr. 15.

- Cesta energie z obvodu kola do akumulátoru a zpět na obvod kola. Účinnost odpovídá:

$$\eta_{R_1} = \eta_{tm}^2 \cdot \eta_{tmě}^4 \cdot \eta_{aku} \quad (35)$$

$$\eta_{R_1} = 0,9^2 \cdot 0,96^4 \cdot 0,95 = 0,65$$

- Cesta energie z obvodu kola do akumulátoru a z akumulátorů do napájení pomocných pohonů a vlastní spotřeby o výkonu 35kW. Účinnost odpovídá:

$$\eta_{R_2} = \eta_{tm} \cdot \eta_{tmě}^4 \cdot \eta_{aku} \quad (36)$$

$$\eta_{R_2} = 0,9 \cdot 0,96^4 \cdot 0,95 = 0,73$$

- Cesta energie z obvodu kola přímo do napájení pomocných pohonů a vlastní spotřeby o výkonu 35kW. Účinnost odpovídá:

$$\eta_{R_3} = \eta_{tm} \cdot \eta_{tmě}^2 \quad (37)$$

$$\eta_{R_3} = 0,9 \cdot 0,96^2 = 0,83$$

Jelikož nevíme přesné energetické toky a při nedostatku rekuperované energie může, jak pro trakci, tak i pro pomocné pohony a vlastní spotřebu, nebo i do akumulátoru dodávat energii motorgenerátor. Proto budeme pro rekuperovanou energii uvažovat průměrnou účinnost.

$$\eta_r = \frac{\eta_{R_1} + \eta_{R_2} + \eta_{R_3}}{3} \quad (38)$$

$$\eta_r = \frac{0,65 + 0,73 + 0,83}{3} = 0,74$$

Důležité je též počítat s tím, že elektrodynamická brzda nefunguje až do zastavení, ale jen do určité rychlosti, pak začne její účinek prudce klesat. Následně je vystřídána parkovací brzdou. U hybridního vozidla počítám s mezní rychlostí 5,1 km/h, kde při rychlosti větší brzdí rekuperační elektrodynamická brzda plným účinkem a u rychlosti menší už nerecuperuje žádnou energii.

Hodnoty nevyužitá rekuperační energie zjistím s tachogramu. Pro směr do Javorníka ve S. se jedná o hodnotu 0,115kWh a pro směr do Lipové L. vychází tato hodnota 0,109 kWh.

Při výpočtu spotřeby hybridního vozidla budu vycházet z výpočtu spotřeby konvenčního vozidla, kde je jediný zdroj SM. U hybridního vozidla se vyskytují tři cesty, kterými může proudit energie ze spalovacího motoru. První dvě cesty energie se shodují s konvenčním pohonem. U hybridního vozidla se vyskytuje navíc režim nabíjení akumulátoru, ze kterého může být pak napájen trakční motor, nebo pomocné pohony a vlastní spotřeba. První uvedený režim, kdy je SM nabíjen akumulátor, aby byla následně energie použita pro pohon trakčního motoru je reálná, jelikož výkon na trakčních motorech může být větší než výkon SM. Odměnou je lepší dynamika vozu. Cestu energie ze spalovacího motoru do pomocných pohonů a vlastní spotřeby přes akumulátory

zanedbáme, jelikož se jedná o cestu z velice malou účinností a budu předpokládat, že povětšinu času jsou pomocné pohony a vlastní spotřeba napájeny z motorgenerátoru, nebo z energie vzniklé rekuperací buď přímo s vyšší účinností, nebo z akumulátoru, kde jsme při výpočtu průměrné účinnosti rekuperované energie s touto možností počítali.

Průměrná účinnost energie pocházející ze SM pro trakci, pro pomocné pohony a vlastní spotřebu a pro nabíjení akumulátorů a její následné využití pro trakci získáme následujícím výpočtem.

První dvě účinnosti, kdy jsou ze SM napájeny přímo pomocné pohony a vlastní spotřeba, nebo trakční motor jsme vypočítali už v kapitole 5,2) pomocí vzorců (28) a (29).

Účinnost pro cestu energie ze SM přes akumulátor do trakčního motoru určíme dle obrázku 15.

$$\eta_{H_3} = \eta_{alt} \cdot \eta_{tm}^4 \cdot \eta_{aku} \cdot \eta_{tm} \quad (39)$$

$$\eta_{H_3} = 0,93 \cdot 0,96^4 \cdot 0,95 \cdot 0,90 = 0,68$$

Průměrnou účinnost energie hybridního vozidla pocházející ze SM vypočteme:

$$\eta_H = \frac{\eta_{H_1} + \eta_{H_2} + \eta_{H_3}}{3} \quad (40)$$

$$\eta_H = \frac{0,68 + 0,77 + 0,86}{3} = 0,77$$

Úvaha pro výpočet spotřeby hybridního vozu bude následující. Vezmeme energii pro trakci a napájení pomocných pohonů a vlastní spotřeby, tu vydělíme průměrnou účinností η_H . Od této energie odečteme maximální zrekuprovatelnou energii. Tím získáme potřebnou energii, kterou bude muset dodat SM. Maximální zrekuprovatelná energie je maximální energie pro rekuperaci na obvodě kola, od ní je odečtena energie, která se už nemůže přeměnit na elektrickou (dáno vlastností EDB) a rozdíl je vynásoben průměrnou účinností η_r .

5.3.1) Výpočet spotřeby hybridního vozidla pro jízdu ve směru Javorník ve S.

Z grafů na obr. 16 a obr. 17 vidíme, že energie dodána pro trakci ve směru do Javorníka ve S. je 12,405 kWh pro zrychlení a 16,340 kWh pro udržení konstantní rychlosti. Výkon

pomocných pohonů a vlastní spotřeby je 35kW a jízda v tomto směru trvá 44,76 minuty včetně zastavení.

Celkovou energii, kterou by musel dotad spalovací motor vypočítáme:

$$E_{CM} = \frac{E_{a+} + E_{V_{k+}} + \left(P_{PP} \cdot \frac{T}{60}\right)}{\eta_H} \quad (41)$$

$$E_{CM} = \frac{12,405 + 16,340 + \left(35 \cdot \frac{44,76}{60}\right)}{0,77} = 71,24 \text{ kWh}$$

Dále z grafu na obr. 16 vidíme, že maximální zrekuperovatelná energie na obvodě kola je pro zpomalování a zastavování 11,742 kWh a pro udržení rychlosti na spádu 26,304 kWh. Nevyužitelná energie, která je dána vlastností EDB se rovná 0,115kWh. Tuto hodnotu známe z tachogramu.

Celkovou energii, která je reálně zrekuperovatelná vypočteme:

$$E_{CR} = (E_{b-} + E_{V_{k-}} - E_{EDB}) \cdot \eta_r \quad (42)$$

$$E_{CR} = (11,742 + 26,304 - 0,115) \cdot 0,74 = 28,07 \text{ kWh}$$

Rozdíl energie, který bude muset doplnit spalovací motor.

$$E_{CM} = E_{CH} - E_{CR}$$

$$E_{CM} = 71,24 - 28,07 = 43,17 \text{ kWh}$$

Spotřebu paliva vypočteme dle vzorce (33), počítáme s co nejefektivnějším využíváním měrné spotřeby SM a to s hodnotou 210 g/kWh.

$$M_{PH} = \frac{210 \cdot 43,17}{1000} = 9,07 \text{ kg}$$

Při přepočtu hmotnosti na objem vycházím z hustoty $\rho = 0,870 \text{ kg/dm}^3$. [x2]

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{9,07}{0,87} = 10,42 \text{ dm}^3 \text{ potažmo litrů nafty}$$

Spotřebu na 100km vyjádříme pomocí trojčlenky. Naše trať je dlouhá 30,92km.

$$M_{PH_{100}} = \frac{10,42}{30,92} \cdot 100 = 33,7 \text{ l/100km}$$

5.3.2) Výpočet spotřeby hybridního vozidla pro jízdu ve směru Lipová L.

Z grafu na obr 18 a obr. 19 vidíme, že energie dodána pro trakci ve směru do Lipové L. je 12,946 kWh pro zrychlení a 49,239 kWh pro udržení konstantní rychlosti. Výkon pomocných pohonů a vlastní spotřeby je 35kW a jízda v tomto směru trvá 44,77 minuty včetně zastavení.

Celkovou energii, kterou by musel dodat spalovací motor vypočítáme (41):

$$E_{CM} = \frac{12,946 + 49,239 + \left(35 \cdot \frac{44,77}{60}\right)}{0,77} = 114,68 \text{ kWh}$$

Dále z grafu na obr. 19 vidíme, že maximální zrekuperovatelná energie na obvodě kola je pro zpomalování a zastavování 11,232 kWh a pro udržení rychlosti na spádu 7,059 kWh. Nevyužitelná energie, která je dána vlastností EDB se rovná 0,109kWh. Tuto hodnotu známe z tachogramu.

Celkovou energii, která je reálně zrekuperovatelná vypočteme podle vzorce (42):

$$E_{CR} = (11,232 + 7,059 - 0,109) \cdot 0,74 = 13,45 \text{ kWh}$$

Rozdíl energie, který bude muset doplnit spalovací motor.

$$E_{CM} = E_{CH} - E_{CR}$$

$$E_{CM} = 114,68 - 13,45 = 101,23 \text{ kWh}$$

Spotřebu paliva vypočteme dle vzorce (33), počítáme s co nejefektivnějším využíváním měrné spotřeby SM a to s hodnotou 210 g/kWh.

$$M_{PH} = \frac{210 \cdot 101,23}{1000} = 21,26 \text{ kg}$$

Při přepočtu hmotnosti na objem vycházím z hustoty $\rho = 0,870 \text{ kg/dm}^3$. [x2]

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{21,26}{0,87} = 24,43 \text{ dm}^3 \text{ potažmo litrů nafty}$$

Spotřebu na 100km vyjádříme pomocí trojčlenky. Naše trať je dlouhá 30,92km.

$$M_{PH_{100}} = \frac{24,43}{30,92} \cdot 100 = 79,0 \text{ l/100km}$$

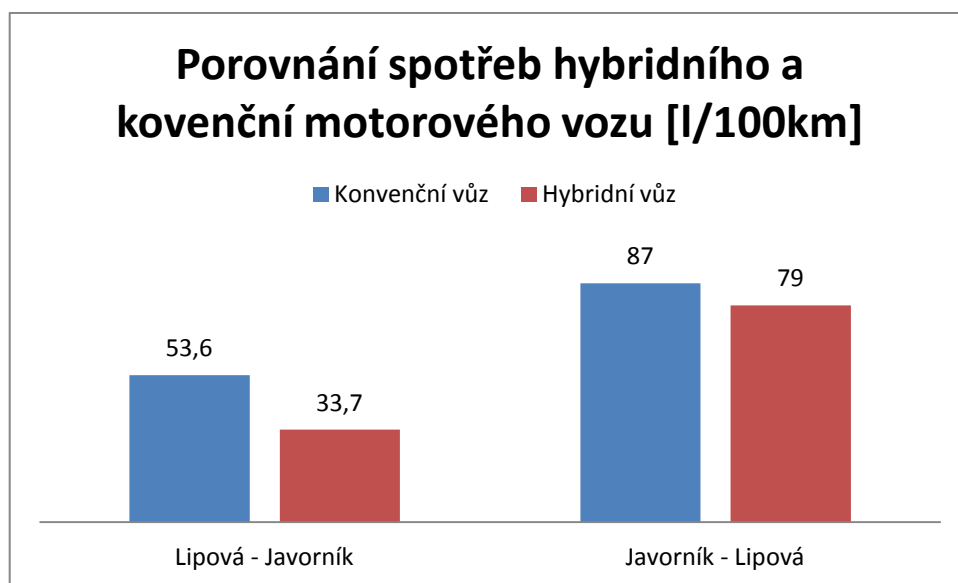
6) Provozně technické zhodnocení

Úspora paliva je závislá na sklonových poměrech trati, kdy při jízdě po méně energeticky náročné trase do Javorníka ve Slezsku na které vozidlo jede asi 2/3 své trasy po spádu, bylo ušetřeno oproti konvenčnímu vozidlu téměř 37,2% paliva, které odpovídalo 6,2 litrům paliva.

Naopak pro druhý směr, kdy se vozidlo vracelo po energeticky náročnější trase do Lipové Lázně, kde vozidlo zdolává 2/3 trasy do stoupání, se výhoda hybridního pohonu ukázala v úspoře 9,2 % paliva, které odpovídalo téměř 2,5 litrům paliva.

Celková spotřeba paliva konvenčního motorového vozu ve směru do Javorníka ve Slezsku byla 16,6 litru paliva. To odpovídá na 30,92km dlouhé trati spotřebě 53,6 l/100km. Hybridní vůz v tomto směru spotřeboval 10,42 l paliva, které odpovídá spotřebě 33,7 l/100km.

V druhém směru do Lipové Lázně spotřeboval konvenční motorový vůz 26,9 litrů paliva, které odpovídaly spotřebě 87 l/100km. Hybridní vůz by zajel trasu se spotřebou 24,43 litrů, kterému by odpovídala spotřeba 79 l/100km.



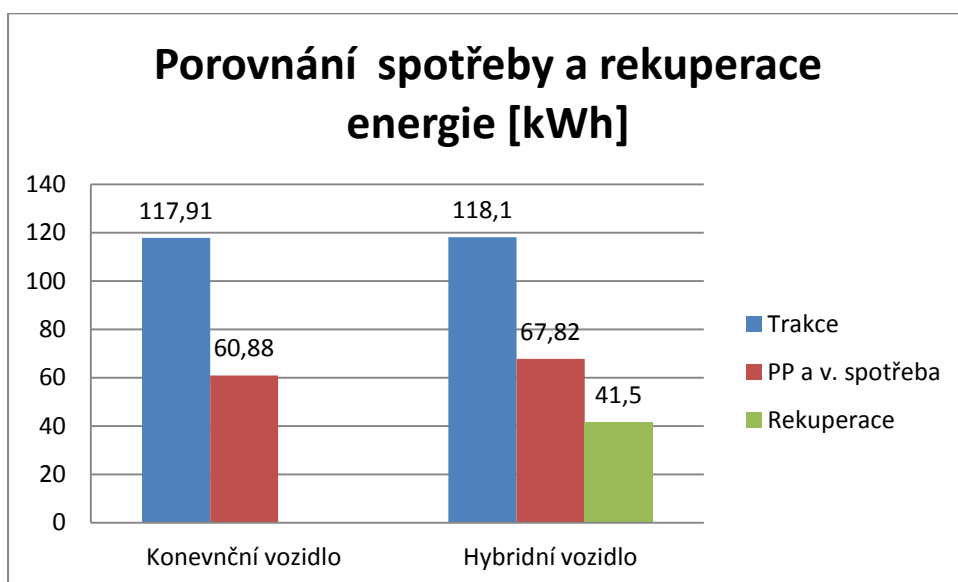
Obr. 23 Graf porovnání spotřeb na 100km ujeté dráhy.

Celková spotřeba paliva konvenčního motorového vozu, při jízdě z Lipové Lázně do Javorníku ve Slezsku a zpět, byla 43,5 litrů nafty. Při ujeté dráze 61,84 km by spotřeba vztahovaná na 100 ujetých kilometrů odpovídala 70,3 l/100km.

Celková spotřeba paliva hybridního motorového vozu, při jízdě z Lipové Lázně do Javorníku ve Slezsku a zpět, byla 34,85 litrů nafty. Při ujeté dráze 61,84 km by spotřeba vztážená na 100 ujetých kilometrů odpovídala 56,4 l/100km.

Celková úspora pro jeden obrat soupravy by byla 8,65 litrů nafty. Průměrná spotřeba klesla ze 70,3 l/100km na 56,4 l/100km tedy o 13,9 litrů na sto kilometrů ujeté dráhy.

Zajímavé je, že spotřeba pomocným pohonu a vlastní spotřeba činila u konvenčního vozidla 34% celkové spotřebované energie. U hybridního vozidla vychází spotřeba pomocných pohonů a vlastní spotřeby, díky více možnostem toku energie 36,5 %. Toto číslo je poměrně vysoké. Proto se nabízí další možnost zefektivnění pomocných pohonů a vlastní spotřeby.



Obr. 24 Graf porovnávající energie určené pro trakci a pro pomocné pohony a vlastní spotřebu. V grafu je také znázorněná hodnota rekuperované energie. Hodnoty se nepatrně liší kvůli různým tokům energie u hybridního a konvenčního vozidla.

Využití rekuperované energie pro jeden obrat hybridní soupravy se pohybuje okolo 22,3% z celkové spotřeby hybridního vozidla.

7) Závěr

V první části práce se zabývám uspořádáním hybridního pohonu, s toho plynoucími výhodami a nevýhodami a technologií jízdy hybridního vozidla. Druhá část práce se zabývá nejčastěji používáními akumulátory v dopravní technice. Třetí část prezentuje vybraná hybridní vozidla na kterých se podíle český a slovenský průmysl. Dále jsou prezentována tři hybridní vozidla pro osobní dopravu. Ve čtvrté a páté části bakalářské práce je popis výpočtu tachogramu a následný výpočet spotřeby paliva pro vymyšlené konvenční a hybridní vozidlo se stejnými parametry. Poslední kapitolu tvoří provozně technické zhodnocení a závěr.

Výpočtem bylo potvrzeno, že hybridní technologie může přinést úsporu paliva. Procentuální úspora nafty pro jízdu z Lipové Lázně do Javorníka ve Slezsku a zpět odpovídala 19,9%. Tato hodnota odpovídá zkušenostem provozovatelů, nebo výrobců hybridních železničních vozidel používaných v osobní dopravě, kde hodnoty snížení spotřeby dosáhly úrovně mezi 10 až 25 %.

Při spotřebě pomocných pohonů a vlastní spotřeby s 30 – 35% podílem celkové spotřeby energie, se nabízí možnost zanalyzovat, jak tuto spotřebu snížit. Největší příkon z vlastní spotřeby a pomocných pohonů, dosahuje zpravidla topení, nebo klimatizace. K zefektivnění této složky vlastní spotřeby a spotřeby pomocných pohonů se nabízí možnosti, jako třeba rekuperace vzduchu, která se používá v nemovitostech. Lepší izolace skříně vozidla. Kompletní osvětlení pomocí LED-diod a podobně.

8) Seznam použitých pramenů

- [1] *Železniční magazín*. Praha: M-Press plus s.r.o, 2012, roč. 2012, č. 1. ISSN 1212-1851.
- [2] ČERNOHORSKÝ, Tomáš. *Hybridní posunovací lokomotiva*. 2009. Dostupné z: <http://dspace.upce.cz/handle/10195/34072>. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Jiří Štěpánek
- [3] Hybridní automobily. [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.hybrid-auto.cz/varianty-hybridu/>
- [4] EHSANI, Mehrdad. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. Boca Raton: CRC Press, c2005, 395 p. ISBN 08-493-3154-4.
- [5] [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: www.powerwiki.cz/attach/XD14EPT/Prednasky_14.ppt
- [6] [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://baracudaj.blog.auto.cz/2008-08/hybridni-automobily-3-jak-funguje-toyota-prius/>
- [7] ČEŘOVSKÝ, Z. *Trakční charakteristiky střídavého elektromechanického přenosu výkonu s elektrickým děličem výkonu*. Dostupné z: <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2002/k314-obden-cer.pdf>. ČVUT Praha.
- [8] *Akumulátor* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Akumul%C3%A1tor>
- [9] *Supravodivost – perspektivní technologie blízké budoucnosti* [online]. 2007 [cit. 2013-05-20]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34841
- [10] *Lokomotiva SBB E 3/3* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Lokomotiva_SBB_E_3/3_%28hybridn%C3%AD%29
- [11] *Co je to elektrochemický zdroj* [online]. 2006 [cit. 2013-05-20]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27013
- [12] JANDURA, Pavel. *Přehled a vlastnosti současných akumulátorů používaných v elektromobilech*. Dostupné z: http://skfm2010.tul.cz/postery/Jandura_Pavel.pdf
- [13] *Superkapacitory v dopravní technice* [online]. Vědeckotechnický sborník ČD č. 25/2008. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: www.cdmail.cz/VTS/CLANKY/vts25/2511.pdf

- [14] MAXWELL. *SUPERKAPACITORY* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.jelektronik.sk/produkty-databaza/4.Pas%EDvne%20S%FA%E8iastky/superkapacitory%20maxwell.pdf>
- [15] *Flywheel Hybrid System: Setrvačníky* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/flywheel-hybrid-system-setrvacniky_40641.html
- [16] HAJER, Václav. *Rekuperace kinetické energie motorových vozidel*. 2009. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17146. Bakalařská práce. VUT Brno. Vedoucí práce František Rasch.
- [17] *SA Peugeot Citroën Hybrid Air dovolí autům jezdit na vzduch, tak trochu* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/psa-peugeot-citroen-hybrid-air-dovoli-autum-jezdit-na-vzduch-tak-trochu/>
- [18] *Testing Begins of Rexroth Hydraulic Hybrid Technology* [online]. 2009. vyd. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.boschrexroth-us.com/country_units/america/united_states/en/Company/Press/press_releases/press_archive/corporate_archives/archive_2009/2009_NYC_Hydraulic_Hybrid_Vehicle_Launch/index.jsp;jsessionid=cbavMFOjp_LFo-IqQRS4t
- [19] *Problematika hydraulických akumulátorů Vážení* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.hydraulicke-akumulatory.cz/hydraulicke_akumulatory.pdf
- [20] *Voith DIWA rail & Voith DIWA pack* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.railwaystrategies.co.uk/article-page.php?contentid=7237&issueid=242&se=1&searchphrase=>
- [21] BOSAČEK, Josef. *SOUČASNÉ MOŽNOSTI ALTERNATIVNÍCH POHONŮ HNACÍCH VOZIDEL* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.railvolution.net/czechraildays/2008/seminare/kv_08.pdf
- [22] POHL, Jiří a Jaromír PERNIČKA a kolektiv. *ŽM - Atlas vozidel: Motorové lokomotivy ČD, ZSSK, průmyslu*. M-Press s.r.o., 2002.
- [23] *Hybridní širokorozchodná lokomotiva TEM35* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://spz.logout.cz/vozidla/tem35/tem35.php>
- [24] *Drehscheibe-online forum* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.drehscheibe-foren.de/foren/read.php?30,6312854>
- [25] *Železniční magazín*. Praha: M-Press plus s.r.o, 2012, roč. 2012, č. 3. ISSN 1212-1851.

- [26] *V Japonsku se bude jezdit hybridním vlakem* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.zelpage.cz/zpravy/5014?id=5014&lang=de>
- [27] *HB-E300 series* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/HB-E300_series
- [28] *Introduction of World's First Hybrid Railcar in Commercial Use* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.jreast.co.jp/e/press/20051102/>
- [29] *Železniční magazín*. Praha: M-Pressé plus s.r.o, 2012, roč. 2012, č. 11. ISSN 1212-1851.
- [30] *Železniční magazín*. Praha: M-Pressé plus s.r.o, 2012, roč. 2012, č. 7. ISSN 1212-1851.
- [31] *MTU Power pack* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.flickr.com/photos/tognum/6515778825/sizes/l/in/set-72157628429369899/>
- [32] TEST VEHICLE HYBRID DB REGIONETZ. [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.nahverkehr-franken.de/rbahn/img_triebwagen/642/642-129_hyb_datenblatt.jpg
- [33] *Hybrid Drive Systems for Rail Vehicles* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.bahnindustrie.info/uploads/media/06_voith.pdf
- [34] HISTORIE ŽELEZNICE NA JESENICKU. [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://heide.sweb.cz/xhistorie.htm>
- [35] ŠIROKÝ, Jaromír. *Mechanika v dopravě I - kolejová vozidla*. Ostrava, 2003. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Skr_MvD.pdf. Skripta. VŠB - TU Ostrava.
- [36] *Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel* [online]. Vědeckotechnický sborník ČD č. 29/2010. 2010 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/vts29/2908.pdf>
- [37] *ČD D2/I: DOPLNĚK s technickými údaji k Dopravním předpisům*. 1994.
- [38] *Stadler Regio-Shuttle RSI* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.vlaky.net/upload/images/reports/004222/Stadler.pdf>
- [39] POHL, Jiří. *Rychlá železniční osobní doprava* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://vrt.fd.cvut.cz/data/prednasky/pohl2008.pdf>
- [40] SODOMKA, Tomáš. *Energetická náročnost železniční dopravy ve spojení Evropa Asie*. Pardubice, 2012. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/46605/3/SodomkaT_EnergetickNarocnost_R

D_2012.pdf. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Radovan Doleček.

- [41] DANZER, Jiří. *ELEKTRICKÁ TRAKCE 6.: VLASTNÍ SPOTŘEBA A CHLAZENÍ*. 2008. Dostupné z:
<http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/ET/ET%20skripta%20Danzer/ETR600.pdf>
- [42] *Spotřeba paliva* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z:
http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Spoteba_paliva.pdf
- [43] *Motorová nafta* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Motorov%C3%A1_nafta

9) Seznam příloh

K bakalářské práci připojuji CD disk, na kterém se nachází kompletní bakalářská práce a Listy aplikace Microsoft Excel s výpočty redukovaného sklonu a tachogramů.

10) Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Jaromíru Širokému, Ph.D za vedení bakalářské práce, cenné rady, které mi poskytl a vstřícný přístup.